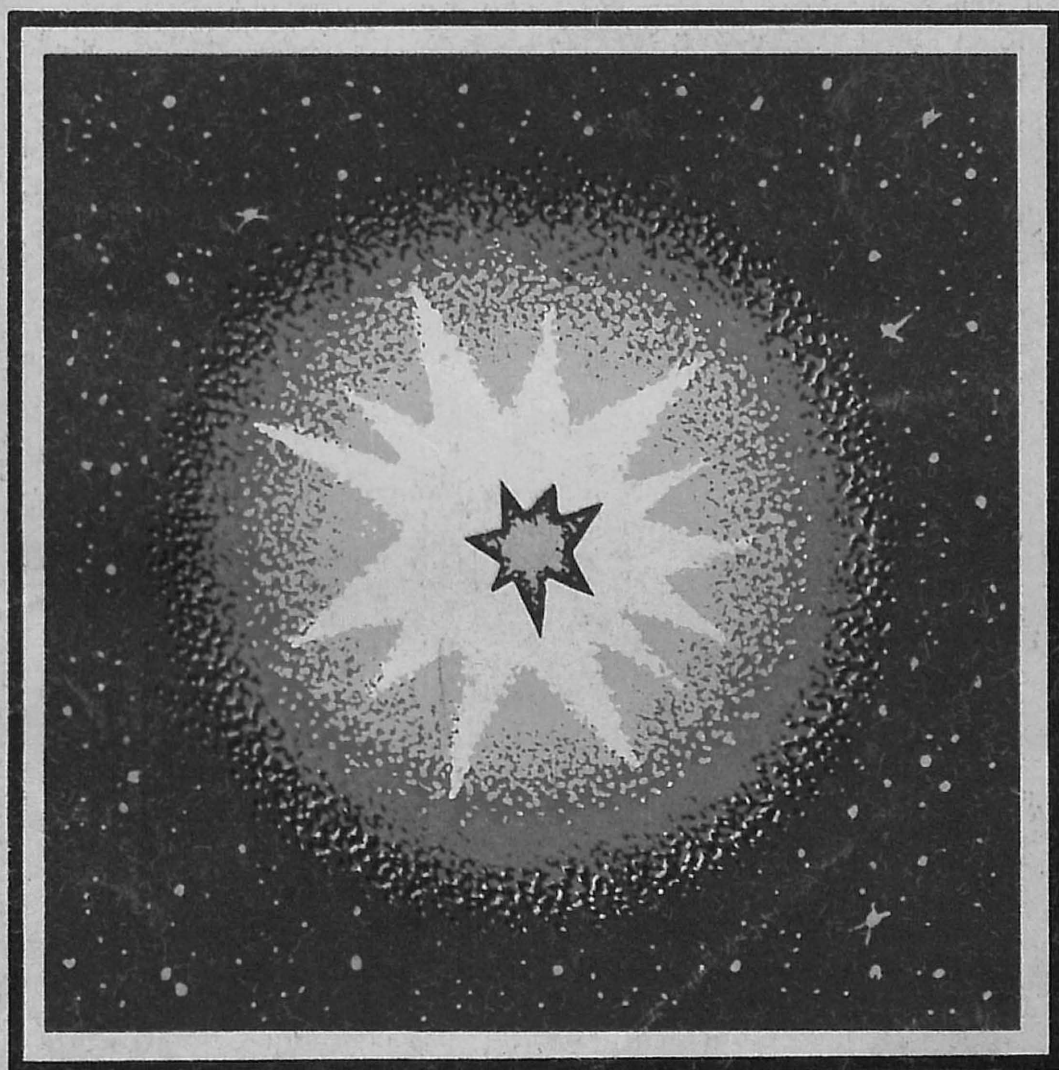


Ю. П. ПСКОВСКИЙ

НОВЫЕ И СВЕРХНОВЫЕ ЗВЕЗДЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

**Серия «Проблемы науки
и технического прогресса»**

Ю. Ц. ПСКОВСКИЙ

**НОВЫЕ
И СВЕРХНОВЫЕ
ЗВЕЗДЫ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1974

Книга знакомит читателей с объектами, которые занимают особое место в звездном мире. Это — новые и сверхновые звезды. Их изучение ведет к пониманию происхождения и развития звезд и галактик.

Читатель узнает много интересного о новых и сверхновых звездах, в частности то, что после взрывов сверхновых остаются пульсары и радиоизлучающие туманности, являющиеся в свою очередь источниками космических лучей, рентгеновского излучения и местом формирования межзвездной пыли и газа.

Книга рассчитана на читателей, интересующихся астрономией.

Ответственный редактор
член-корр. АН СССР
Э. Р. МУСТЕЛЬ

Человеку свойственна жажда знаний. Трудно представить, как существовало бы человечество без этой замечательной черты, играющей не последнюю роль в прогрессе науки, техники и общества.

Неукротимой пытливости человеческого ума в значительной мере обязана своими успехами и наука о Вселенной — астрономия, которая изучает бесконечный и многообразный мир небесных тел.

Вместе с нашей планетой мы также являемся частью Вселенной. Человек освоил поверхность и пространство около Земли, привык к ее условиям, земным представлениям, понятиям. И тем большее впечатление производит на любознательного человека внешний мир — звездное небо, стройность законов движения небесных светил, величественность явлений, происходящих во Вселенной. Здесь все удивляет: и гигантские размеры, и огромные расстояния, и возраст в миллионы и миллиарды лет, и скорости в сотни тысяч километров в секунду, и грандиозные массы, и трудновообразимое количество выделяемой энергии, и температуры — от самых низких до миллиардов градусов, и плотности — чрезвычайно высокие и чрезвычайно низкие. Современная техника и экспериментальная физика еще очень далеки от воссоздания условий, сходных с теми, которые наблюдаются за пределами Земли, на других небесных телах. Некоторые же процессы и условия вообще недостижимы для эксперимента на Земле и могут изучаться только путем наблюдения за небесными телами.

С незапамятных времен человек изучает небесные светила и свойства безграничного пространства, окружающего нашу планету. От невооруженного глаза — к телескопу, от оптических телескопов — к радиотелескопам, от них — к ракетной технике — так возрастал арсенал средств

исследования внешнего мира, который древние греки называли космосом, а мы теперь называем Вселенной. Чем совершеннее эти средства, тем больше раздвигалась область Вселенной, доступная исследованиям, и тем более сложным и многообразным по формам, явлениям и свойствам оказывался реальный мир.

По кругу исследуемых объектов астрономия может быть подразделена на три больших раздела: астрономия Солнечной системы, звездная астрономия и внегалактическая астрономия. В таком же порядке шел и исторический процесс развития этой науки. Сейчас активно развивается каждый из указанных разделов. Например, астрономия Солнечной системы вступила в период ракетных исследований и завоевания планет и межпланетного пространства человеком. Звездная астрономия из раздела, занимавшегося главным образом звездной статистикой и классификацией физических свойств звезд, быстро превращается в дисциплину, изучающую физическую структуру звезд и туманностей и всей нашей звездной системы (Галактики), а также их эволюцию. Особенно бурное развитие происходит во внегалактической астрономии, проблемы которой тесно связаны с современной физикой: теорией относительности, ядерной физикой и радиофизикой.

Не только звезды, Солнце и планеты привлекали издавна взоры людей к небу. В еще большей степени их поражали грандиозные небесные явления, внезапно происходившие на их глазах. Чаще всего это были яркие, иногда видимые даже днем светила. События такого характера часто отмечались в летописях, хрониках, жизнеописаниях выдающихся деятелей древности, а еще ранее — в древнейших памятниках человеческой культуры: в резьбе на кости и наскальных рисунках.

Сейчас мы знаем, что такими яркими феноменами были небесные явления, совершенно несравнимые по своим размерам. Не шутка ли природы, что такие явления, как затмения Солнца Луною, падения крупных метеоритов, визиты к Солнцу комет, являющихся в сущности, даже в сравнении с любой планетой или спутником, телами ничтожной массы, — эти явления производили одинаково сильное впечатление на людей, такое же, как и действительно крупнейшие катастрофы звездного мира — вспышки звезд, называемые новыми звездами?

Только в современную эпоху, в наши дни астрономам становится ясным, что представляют собой новые звезды и самые яркие, самые мощные вспышки, за которыми утвердилось наименование сверхновых звезд.

Новые и сверхновые звезды занимают особое место в звездном мире. Чтобы понять их роль и действительные события, протекающие в них, нам нужно познакомиться с широким кругом астрономических проблем. Мы совершим путешествие в Галактику — этот остров звездного мира, где расположена и наша Солнечная система, выйдем за его пределы, к другим галактикам, где тоже обнаружены новые и сверхновые звезды. Мы увидим, что изучение этих удивительных объектов находится на оживленном перекрестке астрофизики, через который пролегают пути к пониманию происхождения и развития звезд, газовых туманностей, галактик, космических лучей и т. п. Мы совершим путешествие также и в прошлое, к древним рукописям, в которых иногда обнаруживаются интересные сведения о вспышках звезд, сохранившие ценности и для современной науки. Но прежде мы ознакомимся с основными астрономическими инструментами, способами наблюдения и анализа их результатов. Кое с чем — немедленно, с остальными — по пути.

АСТРОНОМЫ ИССЛЕДУЮТ ЗВЕЗДЫ

Звездное небо

Ясным вечером, когда небо начинает темнеть, на нем становятся видны звезды. Сначала самые яркие — 1-й величины, затем те, что слабее: 2, 3, 4-й — и так до звезд 6-й величины. Последние доступны простому глазу лишь, когда наступит полная ночь.

В это же время, если на небе нет Луны, можно видеть широкую белесую полосу, называемую Млечным Путем.

Еще в глубокой древности было замечено, что звезды расположены по небу не равномерно, а в самых причудливых сочетаниях. Такие сочетания названы созвездиями. Основу каждого созвездия составляет фигура из нескольких звезд 1 — 3-й величины, а по ним легко отыскать и более слабые звезды, если имеется под рукой карта звездного неба.

Вплоть до изобретения телескопа знание созвездий было основой астрономических наблюдений за движением звездного неба, Луны и планет. Благодаря хорошему знанию звездного неба астрономам удавалось обнаружить «новые» звезды на тех местах, где раньше их не наблюдали. Быстро разгоревшись, эти звезды в одних случаях быстро угасали, а в других — слабели постепенно и через несколько недель, реже — месяцев снова становились невидимыми. В наше время с помощью телескопов ежегодно открывается до десятка новых звезд, но, как это ни покажется странным, самые яркие новые звезды и в нашем веке были открыты любителями астрономии, хорошо знакомыми со звездным небом, без помощи телескопа.

Разные народы по-своему делили небо на созвездия и давали свои им названия. Ныне мы пользуемся системой из 88 созвездий, в числе которых более пятидесяти остались от древних греков.

Почему же эллинская система созвездий, а не какая-либо другая положена в основу современной? Не только потому, что эллинская наука и культура были предшественницами современных. Главное заключается в том, что древнегреческие астрономы составили чрезвычайно подробные описания звездного неба. Так, каталог, составленный во II в. до н. э. Гиппархом, включал около 500 звезд. На его основе образовалась современная система созвездий и на протяжении многих веков велись исследования положения и блеска звезд. Каталог Гиппарха переписывали, уточняли, совершенствовали и пополняли астрономы древней Греции, древнего Рима, Арабского Востока и Европы. Так и получилось, что этот каталог и перечисляемые в нем созвездия стали интернациональной системой созвездий.

Известна причина, которая побудила Гиппарха составить звездный каталог. О ней нам поведал древнеримский историк Плиний. Около 134 г. до н. э. в созвездии Скорпиона наблюдалась яркая вспышка новой звезды. Заинтересовавшись этим, пишет Плиний, Гиппарх и решил переписать все звезды, чтобы можно было обнаружить появление новых звезд в будущем.

Но для осуществления такой задачи нужно было не только описать положение звезд в созвездиях, но и указать, какая из них и насколько ярче или слабее соседних. Для этой цели Гиппарх распределил звезды на шесть классов по силе их блеска. Как мы уже говорили, самые яркие звезды получили наименование звезд 1-й величины, а самые слабые, видимые острым глазом, — 6-й. Промежуточные же между ними подразделения на величины были проведены так, что звезды 2-й величины выглядели для глаза слабее звезд 1-й величины настолько же, насколько звезды 2-й величины выглядели ярче звезд 3-й величины, и т. д.

Впоследствии, уже в XIX в., выяснилось, что такое подразделение звезд на классы возникло не случайно. Оно вытекает из свойства человеческого глаза: если блеск звезд ослабевает в геометрической прогрессии, то глаз это ощущает как ослабление светового впечатления в арифметической прогрессии, т. е. как убывание блеска на постоянную величину. Звезда 6-й величины на пять величин слабее звезды 1-й величины, причем количество света, приходящее от них, различается в 100 раз. Из

этого установленного наблюдениями факта можно вычислить знаменатель геометрической прогрессии, на котором основано подразделение на звездные величины: $\sqrt[5]{100} = 2,512$. Другими словами, при уменьшении блеска в 2,512 раза мы получаем изменение на одну величину.

Звездные величины, удачно введенные когда-то Гиппархом, оказались удобной мерой блеска звезд. Теперь астрономы умеют измерять блеск звезд очень точно и оценка звездной величины, обычно отмечаемая значком m после целой части числа, дается с двумя десятичными знаками после запятой.

Итак, блеск в звездных величинах — это выражение в логарифмической шкале меры световой энергии звезды, принимаемой глазом в единицу времени, а математически — это величина, пропорциональная логарифму освещенности. Пусть освещенность, создаваемая первой звездой, будет E_1 , а второй — E_2 . Тогда разность их блеска в звездных величинах будет выражаться так называемой формулой Погсона:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \lg E_1/E_2,$$

где m_1 — звездная величина первой, m_2 — второй звезды.

Это простое соотношение между звездными величинами и освещенностями составляет основу звездной фотометрии, т. е. методов точного измерения блеска звезд. Как видим, звездная фотометрия — старейший метод астрономии. Она возникла более двух тысяч лет назад и связана с именем Гиппарха, которого астрономы средних веков не случайно называли отцом астрономии.

В 1609 г. Галилей впервые направил на небо телескоп. С этого момента началась триумфальная эпоха телескопической астрономии. До изобретения телескопа внешний мир для астрономов ограничивался пятью планетами, Солнцем, Луной, кометами и несколькими тысячами звезд, видимых простым глазом. В телескоп же астрономы увидели бесчисленное множество звезд, бывших недоступными из-за слабого блеска. Выяснилась и природа Млечного Пути. Эта светящаяся полоса, как бы поясом охватывающая небо, оказалась состоящей из множества слабых звезд. Дальнейшее изучение Млечного Пути показало, что наше Солнце и все видимые простым глазом звезды тоже принадлежат к этому большому облаку

звезд, называемому теперь Галактикой (от греческого галактос — млечный).

Около столетия назад во многих астрономических исследованиях начали применять фотографирование небесных светил. Телескоп стал служить гигантским фотоаппаратом. Оказалось, что фотографирование небесных объектов и явлений сочетает ценнейшие качества, какими не обладают даже многие новейшие средства наблюдений. Оно позволяет быстро, документально точно и подробно зарегистрировать явление и окружающие его детали. Другие новые средства наблюдений: спектроскопия, фотоэлектроника, телевизионная и радиоастрономическая техника — наиболее успешно применяются совместно с фотографической.

С появлением фотографии определение блеска звезд стало проводиться более удобным и точным фотографическим способом. Правда, новый фотоэлектрический способ измерения блеска еще более точен, но если фотографическим путем можно получить фотографию тысячи звезд за какие-нибудь полчаса и затем обрабатывать полученный снимок в лаборатории на светоизмерительных приборах, то за полчаса у телескопа фотоэлементом удастся измерить блеск всего нескольких звезд. Поэтому фотоэлектрически измеряется блеск нескольких звезд, полученных также и на фотоснимке, с тем, чтобы с ними можно было как можно надежнее сравнить блеск остальных звезд, зафиксированных фотоаппаратом. Такое комбинирование фотографического и фотоэлектрического способов снижает точность измерений блеска звезд ненамного, но дает значительный выигрыш — большую экономию времени работы телескопа.

Звезды, изменяющие блеск

Нам теперь следует оговориться, что вспышки новых звезд наблюдались и до Гиппарха. Древнейшие из дошедших до нас сведений о них относятся к третьему тысячелетию до нашей эры. Это были наблюдения, выполнявшиеся в древнем Китае.

В древних странах Востока и Запада, а также в средние века в Европе и на Арабском Востоке внимание к необычным явлениям было не случайным. Тогда существовало убеждение, что небесные явления — это знаки,

предсказывающие важные события в жизни государств и людей. Поскольку, скажем, правителя страны крайне интересовало, будет ли его царствование удачным и не случатся ли бедствия: засуха, наводнение, землетрясение, эпидемия, нашествие, будут ли, наконец, благоприятны его «большие» дела: войны, строительство плотин, стен и т. п., наблюдение за небом носило характер важного государственного мероприятия.

Наблюдения древних астрономов, бывших поповоле и астрологами, выполненные с далекими от настоящей науки целями, являются единственной и довольно аккуратной записью астрономических явлений на протяжении нескольких тысячелетий.

Сейчас астрономы часто обращаются к древним наблюдениям комет и новых звезд. По восточным и европейским хроникам, например, удалось проследить почти все обороты яркой кометы Галлея за четыре тысячелетия и обнаружить периодичность некоторых других комет. На местах вспышек сверхновых звезд сейчас обнаружены расширяющиеся газовые туманности с сильным радиоизлучением.

В эпоху телескопической астрономии были обнаружены разнообразные по свойствам звезды, изменяющие свой блеск. Они получили название переменных. Новые звезды, как мы увидим далее, также являются одним из классов переменных звезд. Важнейшей характеристикой любой переменной звезды является так называемая кривая блеска, т. е. график изменения ее блеска со временем.

Примеры кривых блеска мы найдем в последующих главах, посвященных новым и сверхновым звездам.

Ныне переменные звезды систематизированы в подробной классификационной схеме, с которой мы теперь познакомимся. Прежде всего по характеру причин изменности они подразделяются на две группы: на физические переменные и затменно-переменные. Изменение блеска у первых вызвано внутренними физическими причинами, вторые же являются разновидностью так называемых двойных звезд.

Физические переменные звезды по причинам изменности и по характерам кривых блеска в свою очередь подразделяются на две группы: пульсирующие и эрруптивные переменные.

Пульсирующие звезды периодически изменяют блеск, что отражает колебания размеров их газовых шаров. Наиболее важный класс пульсирующих звезд — цефеиды, пульсация которых отличается строгой периодичностью. Наблюдениями обнаружено, что, чем длиннее период изменения блеска цефеиды, тем больше мощность ее излучения. Поэтому по видимому блеску и длине периода пульсации цефеиды можно определять расстояние до нее.

К эрруптивным звездам относятся различные объекты с нерегулярными во времени и большими по величине колебаниями блеска. Среди них особенно бурным характером изменений блеска выделяются так называемые вспыхивающие или взрывные переменные. Важнейшим видам этих взрывных переменных звезд и посвящена наша книга. В этих звездах, как мы увидим, происходят внезапные освобождения большого количества энергии (взрывы) в механической и тепловой формах, что на некоторое время во много раз увеличивает их блеск. В порядке убывания мощности взрыва различают: сверхновые, новые, повторные новые, карликовые новые (переменные типа U Близнецов) и новоподобные переменные. Вспышки в трех последних классах носят циклический характер, т. е. повторяются через некоторые интервалы времени.

Что касается двойных звезд, то по способу выявления их двойственности они подразделяются на визуально-двойные, спектрально-двойные и затменно-переменные. И спутник и главная звезда в визуально-двойной системе видны в телескоп. Наблюдения за ними в течение многих лет позволяют рассчитать орбиту движения спутника около главной звезды. А по характеристикам этой орбиты можно вычислить массы обеих звезд. Это — единственный способ прямого определения масс звезд! А масса является самой важной характеристикой звезды, предопределяющей все ее существование.

Что касается спектрально-двойных звезд, то они являются такими тесными парами, что их двойственность обнаруживается только с помощью спектральных приборов, о которых мы будем подробно говорить ниже. Кроме того, мы вернемся к спектрально-двойным звездам в главе IV, посвященной объяснению явления новых звезд, потому что у новых спустя многие годы после

вспышки часто обнаруживаются явные признаки спектрально-двойных звезд.

Наконец, затменно-переменные звезды. Они являются одновременно и переменными по блеску и часто спектрально-двойными по структуре. Система из двух звезд выглядит для наблюдателя на Земле как затменная звезда, если луч зрения лежит почти в плоскости орбиты этой системы. При обращении этой системы звезды попеременно заслоняют друг друга и мы видим систематические колебания блеска.

Затменно-двойные звезды важны в астрономии как одно из средств определения диаметров звездных газовых шаров и изучения свойств их излучающих поверхностей.

Спектральный анализ

С конца прошлого века важным средством исследования небесных светил стал спектральный анализ. С его помощью получены сведения о природе светил, их движении, развитии и химическом составе.

Спектральный анализ основан на свойстве света разлагаться на составляющие его цветовые лучи, т. е. в спектр. По зрительному ощущению мы различаем в спектре семь основных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый, но в действительности наблюдается переход от одного цвета к другому через промежуточные оттенки. Почему цвета в спектре располагаются в строго определенном порядке, установлено исследованием природы света. Было выяснено, что свет представляет собой распространяющуюся в пространстве смесь электромагнитных колебаний, каждое из которых имеет свой период и соответствующую ему длину волны. Длины волн в спектре принято измерять в специальных единицах — ангстремах ($\text{\AA}$), составляющих одну стомиллионную часть сантиметра. В видимом спектре длины волн уменьшаются от красных (около $7000 \text{\AA}$) до фиолетовых (около $4000 \text{\AA}$). Длины волн остальных цветов заключены между ними. К видимым лучам примыкают невидимые: короче $4000 \text{\AA}$ — ультрафиолетовые и длиннее $7000 \text{\AA}$ — инфракрасные (рис. 1).

Разлагают свет в спектр спектральные приборы, важнейшая деталь которых стеклянная призма или ди-

фракционная решетка. Свет в призме преломляется, причем лучи с большей длиной волн отклоняются от первоначального направления меньше, чем лучи с короткой длиной волны. Разделившиеся лучи попадают в зрительную трубу или фотокамеру.

Спектральные исследования небесных тел основаны на законах излучения. При разогревании тел повышается их температура. У твердых тел она представляет собой

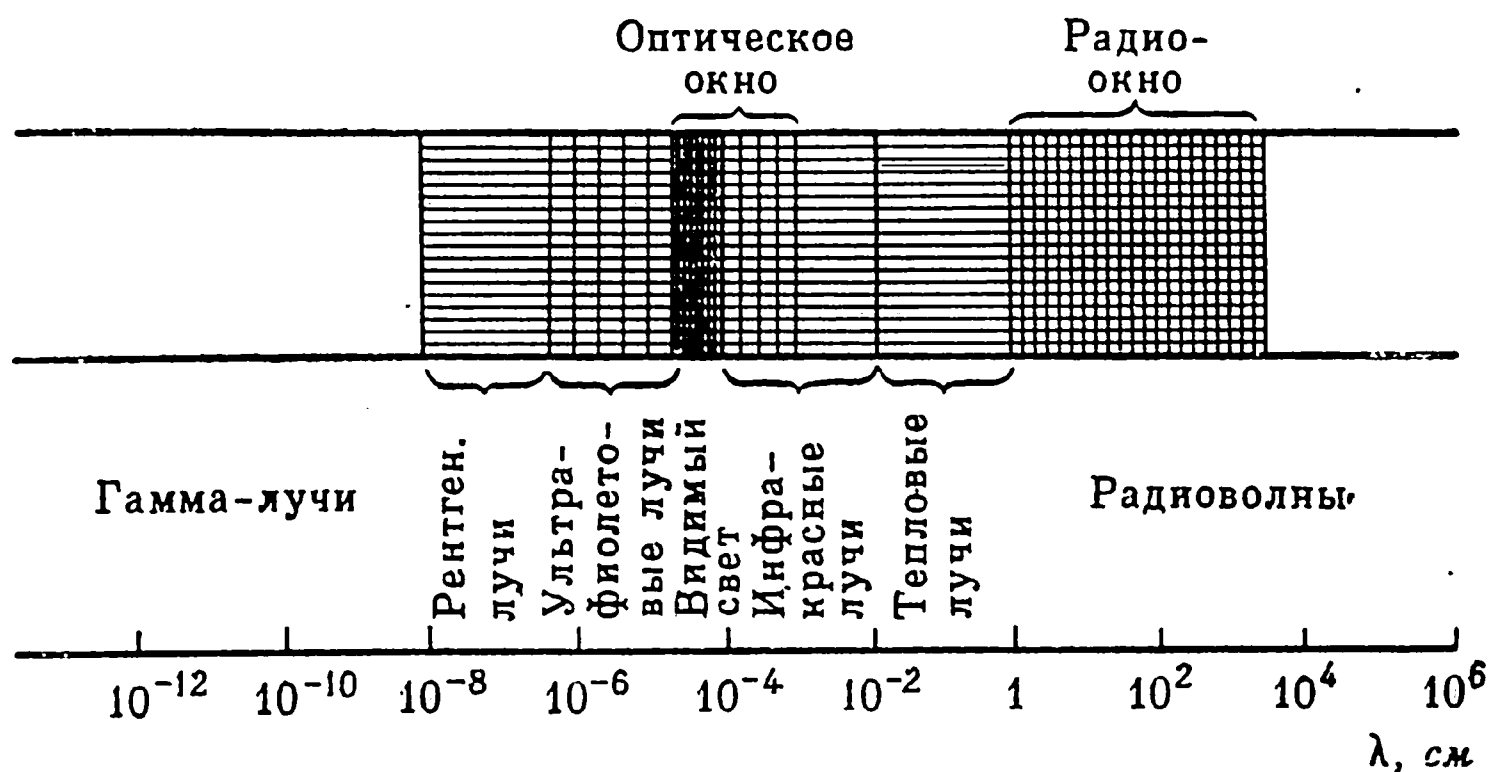


Рис. 1. Шкала электромагнитных волн и «окна прозрачности» земной атмосферы

меру колебательной энергии их атомов, а у жидких и газообразных — меру кинетической энергии свободных атомов и молекул. У нагретых твердых и жидких тел излучение имеет плавный, непрерывный по длинам волн спектр. Яркость того или иного участка спектра характеризует количество излучаемой телом энергии на этой длине волны. Например, у тел, нагретых до 4000°K , наиболее ярким будет красный участок спектра, а по мере дальнейшего повышения температуры ярче его становятся последовательно другие участки спектра. У тел, нагретых выше 7000°K , излучение всего ярче в ультрафиолетовых лучах: Глаз не различает эти лучи, зато их чувствуют фотоэлементы и фотоэмульсии. Например, обычные фотопластинки воспринимают излучения с длинами волн до $2000\text{ \AA}$. Но имеются специальные сорта фотопластинок и так называемые фотосопротивления, которые воспринимают инфракрасные излучения,

а еще более длинноволновые излучения измеряются термоэлементами и радиоприемными аппаратами.

Сплошные спектры излучают только твердые и жидкие нагретые тела. У газообразных тел спектры совсем иного характера. Дело в том, что нагретый газ излучает свет в узких участках спектра, имеющих вид ярких линий, называемых спектральными. Это очень важное свойство спектров газов, позволившее разносторонне исследовать газообразные небесные тела — звезды, туманности и атмосферы планет.

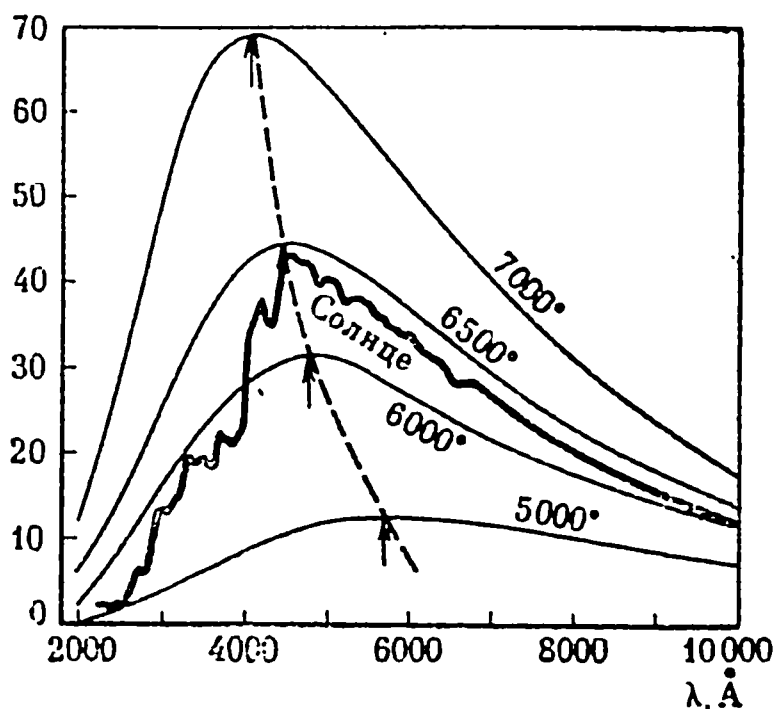
Почему газы излучают спектральные линии, объяснила квантовая теория излучения. Атомы поглощают и отдают (излучают) энергию строго определенными порциями (квантами). Чем больше порция, тем в более возбужденном состоянии оказывается атом, поглотивший энергию. Напомним, что сам атом, как известно из физики, представляет собой систему, состоящую из ядра и облака электронов. Процесс поглощения порции энергии состоит в том, что ее получает один самый удаленный от ядра электрон. Чем больше квант энергии, тем независимее ведет себя этот электрон по отношению к атому. Тот и другой находятся, как говорят, в возбужденном состоянии. Если квант, захваченный электроном, достаточно велик, то электрон может совсем оторваться от атома: происходит ионизация. Атом, потеряв электрон, становится положительно заряженным ионом (один раз ионизованным), а электрон — свободным. В остальных случаях энергии кванта на ионизацию атома не хватает и через считанные доли секунды атом (его электрон) отдает порцию энергии в виде излучения. Энергия может отдаваться одной большой порцией или несколькими малыми, которым соответствуют определенные длины волн, т. е. спектральные линии. Эти линии мы и исследуем в спектрах газообразных тел.

Распределение энергии излучения по непрерывному спектру и его зависимость от температуры излучающего тела устанавливаются законом Планка. График выражаемой им зависимости для нескольких температур и график распределения энергии в спектре Солнца приведены на рис. 2. С законом Планка тесно связан закон Стефана, определяющий соотношение между температурой источника и полным количеством энергии, проходящим через квадратный сантиметр его излучающей поверхности (эта

величина носит название полного потока излучения). Полный поток излучения согласно закону Стефана пропорционален четвертой степени температуры излучающего тела.

Но действительные закономерности излучения небесных светил более сложны, чем закон Планка. Во внутренних слоях звезд этот закон соблюдается неуклонно, но излучение оттуда к нам прямо не приходит, а поглощается атомами наружных слоев звезды. Величина же этого поглощения в сильной степени зависит от химического

Рис. 2. Ход интенсивности планковского (теплового) излучения по спектру для четырех температур и для излучения по спектру Солнца. Стрелками обозначены максимумы интенсивности (по вертикали — относительная интенсивность)



состава и температуры излучающих слоев звезды. И хотя распределение по спектру выходящей из звезды энергии отличается от закона Планка, мы можем по нему найти величину полного потока излучения и с помощью закона Стефана вычислить соответствующую этому потоку температуру. Эта температура носит название эффективной температуры и характеризует нагрев излучающей звездной поверхности.

Еще один важный закон связывает излучение и поглощение света газами. Если газ поместить перед более горячим источником с непрерывным спектром излучения, то на фоне яркого сплошного спектра появятся темные спектральные линии поглощения нашего газа — те же самые, что ранее были видны в спектре газа как яркие спектральные линии (закон Кирхгофа). Поэтому обнаружение тех или иных линий поглощения в спектре звезды указывает на присутствие в ней химических элементов, которым они принадлежат. Правда, отсутствие спектральных линий того или иного элемента еще не означает, что

его нет в звездной оболочке. Просто, в звезде могут быть такие условия, что линии элемента весьма слабы и поэтому незаметны.

С помощью закона Кирхгофа астрономы анализируют строение звездных оболочек и их химический состав.

Сила спектральных линий поглощения зависит не только от числа атомов данного элемента, но и от температуры и плотности слоев звездной атмосферы, где они образуются. По силе линий можно установить поэтому температуру, плотность и другие характеристики звездных атмосфер.

Очень важным принципом спектрального анализа является также эффект Доплера. Он заключается в том, что если источник излучения движется к нам, то длины волн спектральных линий в его спектре уменьшаются, а если удаляется, то увеличиваются. Смещение спектральных линий, таким образом, характеризует скорость движения источника по направлению луча зрения. Эту скорость называют лучевой скоростью светила v (для небесных тел, находящихся вне Галактики, ее обычно называют красным смещением). Выраженная в километрах в секунду, она пропорциональна смещению длины волны наблюдаемой линии λ по сравнению с ее длиной волны λ_0 в неподвижном источнике:

$$v = c(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0,$$

где c — скорость света.

Используя эффект Доплера, астрономы измерили тысячи лучевых скоростей звезд, газовых туманностей и их деталей, красные смещения внегалактических объектов, выяснили закономерности движений звезд и вращения звездных систем, нашли массы звездных скоплений и галактик. Кроме того, исследование красных смещений играет важную роль в изучении общих закономерностей Вселенной в целом.

По характеру спектров звезды делятся на спектральные типы или спектральные классы (рис. 3), которые различаются между собой интенсивностями (силой) важнейших спектральных линий поглощения. Спектральные типы подразделяются на десять подтипов каждый и все вместе образуют непрерывную последовательность от типа

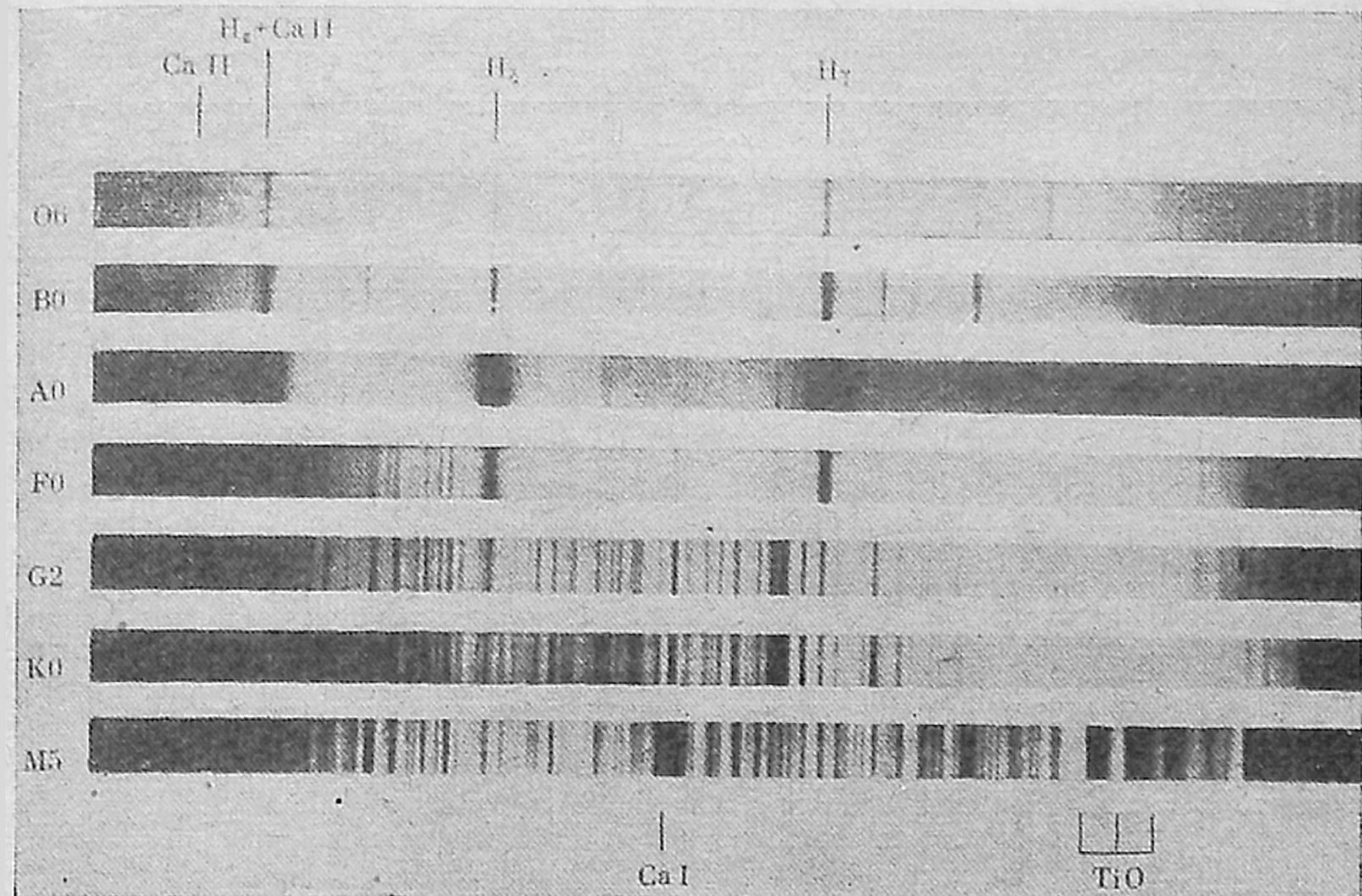


Рис. 3. Спектры звезд основных спектральных классов

Отмечены характерные спектральные линии водорода (H_ϵ , H_δ , H_γ), неионизованного и ионизованного кальция (CaI и $CaII$) и полосы окиси титана (TiO). Резкие линии $CaII$ в спектре горячей звезды O6 имеют межзвездное происхождение и не относятся к атмосфере звезды

O5 до типа M9, вдоль которой вместе с изменением силы поглощения изменяются также и эффективные температуры и цвет звезд. Звезды типов O, B, A называют горячими, F и G — звездами типа Солнца, а K и M — холодными.

Среди холодных звезд встречаются также редкие разновидности, которые отличаются от звезд типа M, присутствием в спектрах полос окиси циркония (тип S) и цинка (типы R и N).

Линии многих ионизованных элементов в спектрах звезд оказываются чувствительными к степени разреженности их атмосфер, поэтому они становятся сильнее в разреженных атмосферах сверхгигантских по размерам звезд. На этом основано определение размеров и мощности излучения звезд по их спектрам.

В табл. 1 даны характеристики спектров звезд основных типов, знакомство с которыми мы продолжим далее.

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕЗД ГЛАВНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ТИПОВ

Спектральный тип	Цвет звезд	Температура фотосферы, °K	Сильнейшие детали в спектре звезды
O	Голубой	45000	Линии ионизованного гелия
B	Голубовато-белый	30000	Линии нейтрального гелия
A	Белый	11000	Линии водорода
F	Светло-желтый	7500	Линии водорода и ионизованного кальция
G	Желтый	6000	То же
K	Оранжевый	5000	Линии ионизованного кальция
M	Красный	3600	Полосы окиси титана

Расстояния до звезд

Находясь на Земле, астрономы могут измерять только видимый блеск звезд и угловые расстояния между ними. Чтобы установить линейные размеры, мощность излучения и размещение звезд в пространстве, нужно уметь находить расстояние до них. Однако в астрономии нет единого, как говорят, универсального способа определения расстояний. По мере перехода от близких светил к далеким один способ сменяется другим, так что для определения расстояния до очень далеких объектов приходится в сущности пройти ступеньки целой лестницы способов. Первая ступенька — определение среднего расстояния от Солнца до Земли (его называют еще астрономической единицей длины). До недавнего времени для вычисления этого расстояния требовалось измерить геодезическими средствами радиус Земли. Сейчас по радиолокационным измерениям расстояний до планет и по наблюдениям за движением межпланетных станций астрономическая единица определяется очень точно и найдена равной 149,6 млн. км.

Для определения расстояний до звезд в астрономии используется мера длины более крупная, чем астрономическая единица. Ее называют парсеком (пс), она содержит 206 265 астрономических единиц или $30,8 \cdot 10^{12}$ км (читается: 30,8 триллиона км). Тысяча парсеков составляет килопарсек (кпс), а миллион парсеков — мегапарсек (Мпс).

Расстояние до самой близкой от Солнца звезды — Проксимы (что в переводе с греческого означает «ближайшая») — в созвездии Центавра равно 1,32 пс, т. е. 40,7 триллиона км.

Часто используется и еще одна астрономическая мера расстояний — световой год, т. е. путь, который свет проходит за год. Он равен $9,46 \cdot 10^{12}$ км, или 0,307 пс, другими словами, 1 пс равен 3,26 световых лет.

Не будем здесь останавливаться на способах определения расстояний до ближайших звезд, подробно описанных в книгах по элементарной астрономии, и остановимся на способе, широко применяемом для оценок расстояний до далеких звезд. Это — метод сравнения видимого блеска и светимости звезд. Светимостью называется мощность всей излучаемой светилом энергии, она измеряется в эргах в секунду. Вычисление светимости в энергетических единицах — задача сложная и не всегда выполнимая. Но, к счастью, для сравнения светимостей достаточно знать блеск светил в видимых звездных величинах m и расстояние r до них, выраженное в парсеках. В этом случае мерой светимости будут служить так называемые абсолютные звездные величины.

Чтобы сравнить светимости звезд, их нужно условно отнести на одинаковое расстояние от наблюдателя. Это расстояние выбрано равным 10 пс. Освещенности, создаваемые одинаковыми источниками, согласно закону освещенностей, обратно пропорциональны квадратам расстояний до источников света. Следовательно, если звезда на расстоянии r от наблюдателя имеет блеск m , то на расстоянии в 10 пс она будет иметь блеск M , который соответствует изменению освещенности, создаваемой звездой в $(10/r)^2$ раз. Подставив теперь эти соотношения в формулу Погсона, получим

$$m - M = 5 \lg r - 5.$$

Отсюда можно получить такое выражение для M :

$$M = m + 5 - 5 \lg r.$$

Звездная величина M , которую имеет светило на расстоянии 10 пс от наблюдателя, и называется его абсолютной звездной величиной.

Из последней формулы можно найти и расстояние r в парсеках, если известны видимая m и абсолютная M

звездные величины светила. Следует еще отметить, что видимые звездные величины удаленных объектов ослабляются не только вследствие закона падения освещенностей, но еще и из-за поглощения света пылинками, имеющимися в межзвездном пространстве. Поэтому видимая звездная величина светила должна быть предварительно исправлена. После исправления формула для определения расстояния будет такая:

$$\lg r = 0,2(m - M) + 1.$$

Таким образом, чтобы найти расстояние до светила, нужно знать его абсолютную величину. Имеется несколько способов оценить ее. Мы уже упоминали, что период колебаний блеска переменных звезд — цефеид — тем длиннее, чем больше их абсолютные величины. Следовательно, сравнительно простым способом — по длительности периода колебаний блеска — мы можем узнать расстояние до цефеиды и до того скопления или звездной системы, где эта цефеида находится.

Если звезды, абсолютные величины которых известны, сопоставить с их спектральными классами, то обнаружится систематическое убывание абсолютных величин большинства звезд по мере перехода от горячих классов к холодным, т. е. от классов О и В к классам К и М (рис. 4). Это большинство, так называемые обыкновенные звезды-карлики, образует главную последовательность на этой диаграмме. Некоторая часть звезд классов F—M сохраняет почти одинаковые высокие абсолютные величины; это — последовательность звезд-гигантов. Самые мощные по светимости звезды, называемые сверхгигантами, встречаются чрезвычайно редко и имеют самые различные спектральные классы. Немного ниже главной последовательности располагаются на диаграмме звезды, называемые субкарликами, а еще ниже — звезды особой категории, называемые белыми карликами.

Графическая зависимость между абсолютными величинами и спектральными классами, изображенная на рис. 4, носит название диаграммы Герцшпрунга—Рессела по имени астрономов, получивших ее впервые в начале текущего века. По горизонтальной оси на ней откладываются спектральные классы (а иногда цвет или температура звезд), а по вертикальной — абсолютные величины звезд (или их светимости). Как мы увидим впоследствии,

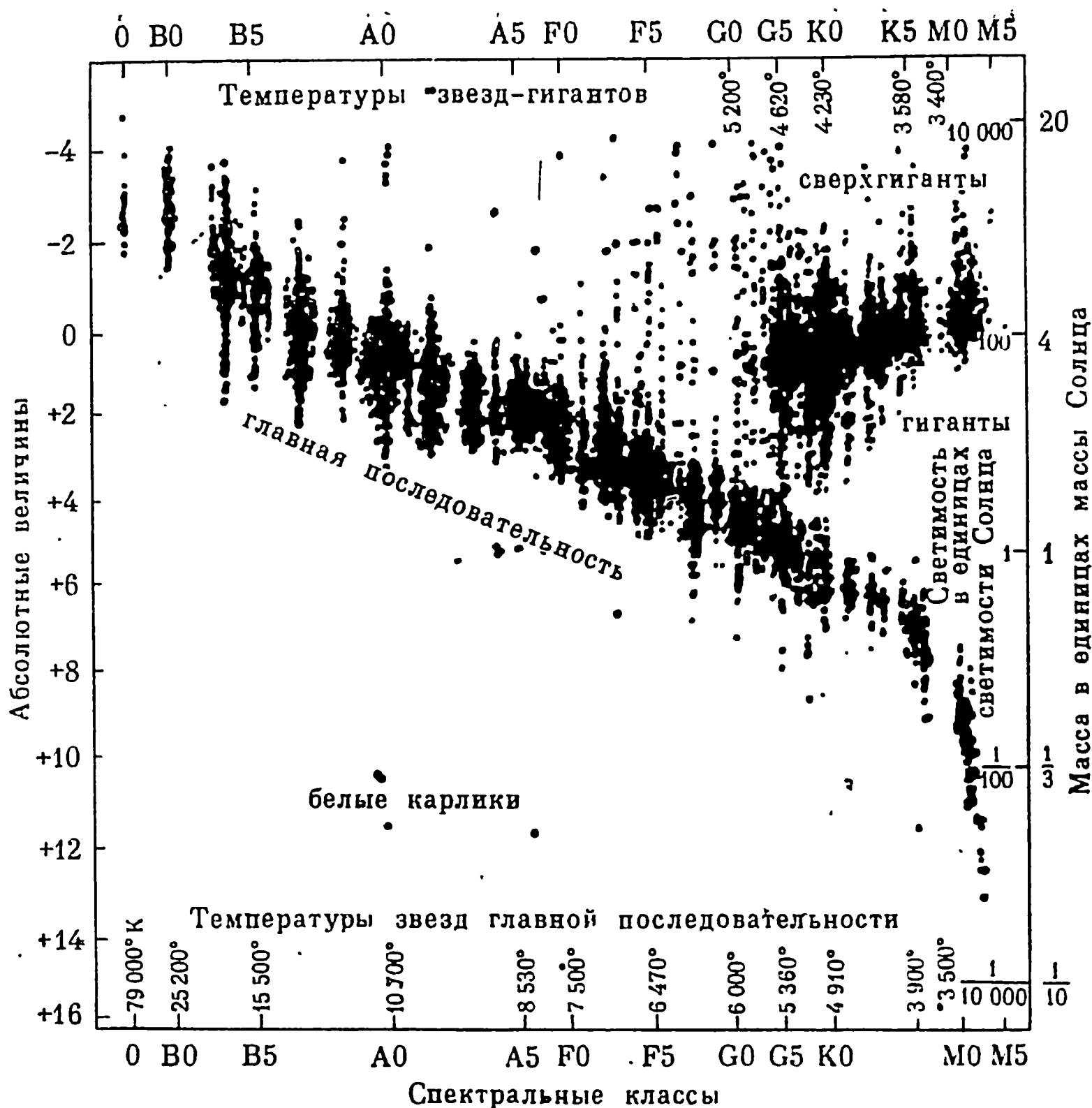


Рис. 4. Диаграмма спектр-светимость (Герцшпрунга—Рессела) для звезд. По нижней горизонтальной рамке отмечены спектральные классы и температуры звезд главной последовательности, по верхней рамке — то же для звезд последовательности гигантов. По левой вертикальной рамке отмечены абсолютные величины звезд, а по правой рамке — светимости и массы звезд, выраженные в долях светимости и массы Солнца.

диаграмма Герцшпрунга—Рессела помогает разобраться в эволюции звезд. Кроме того, она широко применяется и для определения расстояний до звездных скоплений.

Хотя карликовые и гигантские звезды могут иметь один и тот же спектральный класс, второстепенные детали их спектров различны. Например, у карликов усилены линии водорода, тогда как у гигантов в спектрах сильными становятся линии ионизованных атомов. Благодаря этому по интенсивности линий оказалось возмож-

йим оценивать абсолютные величины звезд, принадлежащих одному и тому же спектральному классу. В этом и заключается спектральный способ определения абсолютных величин звезд и расстояний до них. Этим способом найдены расстояния до множества далеких от нас звезд.

Радиоплучение

Крупные телескопы, фотокамеры, фотоэлементы и спектральный анализ — вот средства, которыми располагала астрономия до середины сороковых годов нашего столетия, когда родилась и получила быстрое развитие новая отрасль науки — радиоастрономия. С ней в астрономии появились новые методы исследования, а вместе с ними возникли и новые проблемы. Середину нашего столетия можно считать началом новой эпохи в астрономии, — эпохи, когда наряду с оптическими телескопами важную роль стали играть радиотелескопы и другие новейшие средства космических исследований.

Возникновение радиоастрономии тесно связано с развитием средств дальней радиосвязи. Большой помехой для такой связи был сильный треск в радиоприемниках. В 1932 г. американский исследователь К. Янский обнаружил, что кроме грозových разрядов, создающих сильный треск, есть еще особые устойчивые свистяще-шумящие космические помехи. Они шли из области Млечного Пути в созвездии Стрельца, где, как было позже установлено, находится центральная часть нашего облака звезд — ядро Галактики, которое, как мы теперь знаем, служит самым мощным источником космического радиоизлучения на нашем небе.

Исследования радиоизлучения, приходящего из космического пространства, потребовали создания особых устройств для его собиpания и приема — радиотелескопов, т. е. чувствительных приемников с гигантскими антеннами, которые собирают радиоизлучение и обеспечивают так называемую острую направленность приема.

С помощью радиоастрономических исследований были обнаружены радиоизлучения газовых туманностей и расширяющихся газовых оболочек, являющихся остатками сверхновых звезд, радиогалактики, квазары и пульсары. Исключительно большой успех имели также радиоастрономические исследования структуры нашей Галактики.

БУДНИ ВСЕЛЕННОЙ

Наше Солнце

После беглого знакомства с главными способами астрофизических исследований обратимся теперь к результатам изучения звезд и звездных систем. В этой главе нас будут интересовать главным образом спокойные стадии жизни этих объектов, обычные будничные биографии звезд и галактик. «Мятежными» звездами и бурными стадиями в их жизни займемся позже.

Первым светилом, о котором пойдет речь, будет, естественно, Солнце. Когда были измерены расстояния до звезд и для их исследования был применен спектральный анализ, то стало ясно, что звезды — гигантские горячие шары из газа, а наше Солнце — одна из многих звезд. Но Солнце — единственная звезда, у которой мы видим поверхность. Остальные звезды вследствие удаленности видны как точки и только у ближайших из них специальными приборами можно измерить угловые размеры.

Излучающая поверхность Солнца, называемая фотосферой, — сравнительно небольшой по толщине слой газа, излучение из которого почти свободно выходит в космическое пространство. Фотосфера создает непрерывный спектр Солнца. Измерение энергии, излучаемой Солнцем в непрерывном спектре, показывает, что она соответствует температуре около 6000°K . Температура верхнего слоя фотосферы, который называется обрабатывающим слоем, на тысячу градусов ниже. В нем идут два процесса, создающие линии поглощения солнечного спектра. С одним мы знакомы — это поглощение более холодным газом в соответствии с законом Кирхгофа. Но основная доля интенсивности линий поглощения связана с процессом рассеяния квантов. В отличие от процесса поглощения атом в этом случае только переизлучает захваченный

квант в каком-нибудь направлении. Таким образом, из-за рассеяния мы недополучим квант и видим ослабление спектра — линию поглощения.

Наблюдения солнечных затмений обнаружили еще две внешние оболочки солнечной атмосферы, прозрачные для излучения фотосферы. Это — хромосфера, спектр которой состоит из ярких линий, и солнечная корона. Особенности этих оболочек Солнца являются высокая разреженность и высокие температуры, значительно превышающие температуру фотосферы: у хромосферы температура около $10\,000^\circ\text{K}$, а у короны она доходит до 2 млн. градусов. Сходную структуру внешних слоев имеют и другие звезды.

Солнце излучает огромную энергию. На квадратный сантиметр поверхности Земли, перпендикулярной к лучам Солнца, мы получаем (если не учитывать поглощение в атмосфере) две калории в минуту. Полное излучение Солнца (его светимость) составляет $3,8 \cdot 10^{33}$ эргов в секунду. Откуда же оно черпает такую энергию? Можно подсчитать, что энергии сжатия его газа под действием силы тяготения к центру хватило бы всего на 50 млн. лет. Это немногим меньше длительности последней геологической эры (кайнозойской). Возраст же Земли составляет около 4,5 млрд. лет, а Солнца, как мы далее увидим, и того более. Следовательно, сжатие Солнца не может служить единственным и постоянным источником энергии.

Источник мощного излучения Солнца таится в структуре его внутренних слоев, которые недоступны прямым наблюдениям. Однако представление о них дают теоретические исследования. Газовый шар с массой Солнца $M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$ г находится под воздействием двух сил: силы тяготения к своему центру и силы газового давления, стремящейся расширить шар. Силы эти уравновешены. Давление внутри Солнца растет в глубину и в центре доходит до 200 млрд. ат при температуре около 13 млн. градусов и плотности около 100 г/см^3 .

Высокая температура в центре Солнца создает благоприятные условия для протекания термоядерных реакций. Так называются реакции между ядрами атомов, при которых происходит слияние двух легких ядер и образование более тяжелого ядра атома другого химического элемента. При этом слиянии выделяется большое количество энергии. При температурах 10—14 млн. градусов может идти реакция слияния протонов, т. е. ядер водо-

рода. Окончательным продуктом ее являются ядра атомов гелия. В ходе последовательных превращений водорода сначала в тяжелый водород, а затем в гелий выделяется 200 млрд. калорий на каждый грамм водорода. Это в десять раз больше того, что выделяет один грамм урана-235 в известной реакции деления его атомных ядер. Другой важной особенностью термоядерных реакций этого типа является медленный характер некоторых из них, что обеспечивает спокойный равномерный темп выделения энергии в центре звезды.

При термоядерных реакциях энергия выделяется главным образом в виде очень жесткого рентгеновского излучения и рождающихся в ходе реакций элементарных частиц, из которых важнейшими являются нейтрино. Свободно проходя через недра звезды, нейтрино уносят с собой около 10% выделившейся энергии.

С ростом температуры возрастает скорость термоядерных реакций и увеличивается возможность образования более сложных ядер.

Современное Солнце состоит на три четверти из водорода, остальное приходится главным образом на гелий. Известная часть гелия образовалась за время существования Солнца в ходе термоядерной реакции. По количеству гелия можно оценить максимальный возраст Солнца. Расчеты дали около 5 млрд. лет. Пройдет еще не меньше времени, прежде чем Солнце исчерпает водородное горючее и перейдет на другой вид топлива — гелий.

Огромная энергия, вырабатываемая в недрах Солнца, должна равномерно выводиться наружу. Как это происходит? В центральных областях энергия находится в двух формах: в виде кинетической энергии движения частиц (тепловая форма) и в виде излучения (световая форма). Соответственно этому передача энергии в наружные слои возможна двумя путями: конвекцией и излучением. При конвекции нагретый газ расширяется, становится легче и всплывает в более высокие и менее плотные слои. При излучении же атом испускает квант (порцию энергии), который поглощается одним из встречных атомов и снова переизлучается в любом направлении. При большой плотности в центральных частях звезды таких поглощений и переизлучений происходит очень много и квант, родившийся в центре звезды, долго странствует по ее недрам, распадается на кванты меньшей энергии, которые спустя

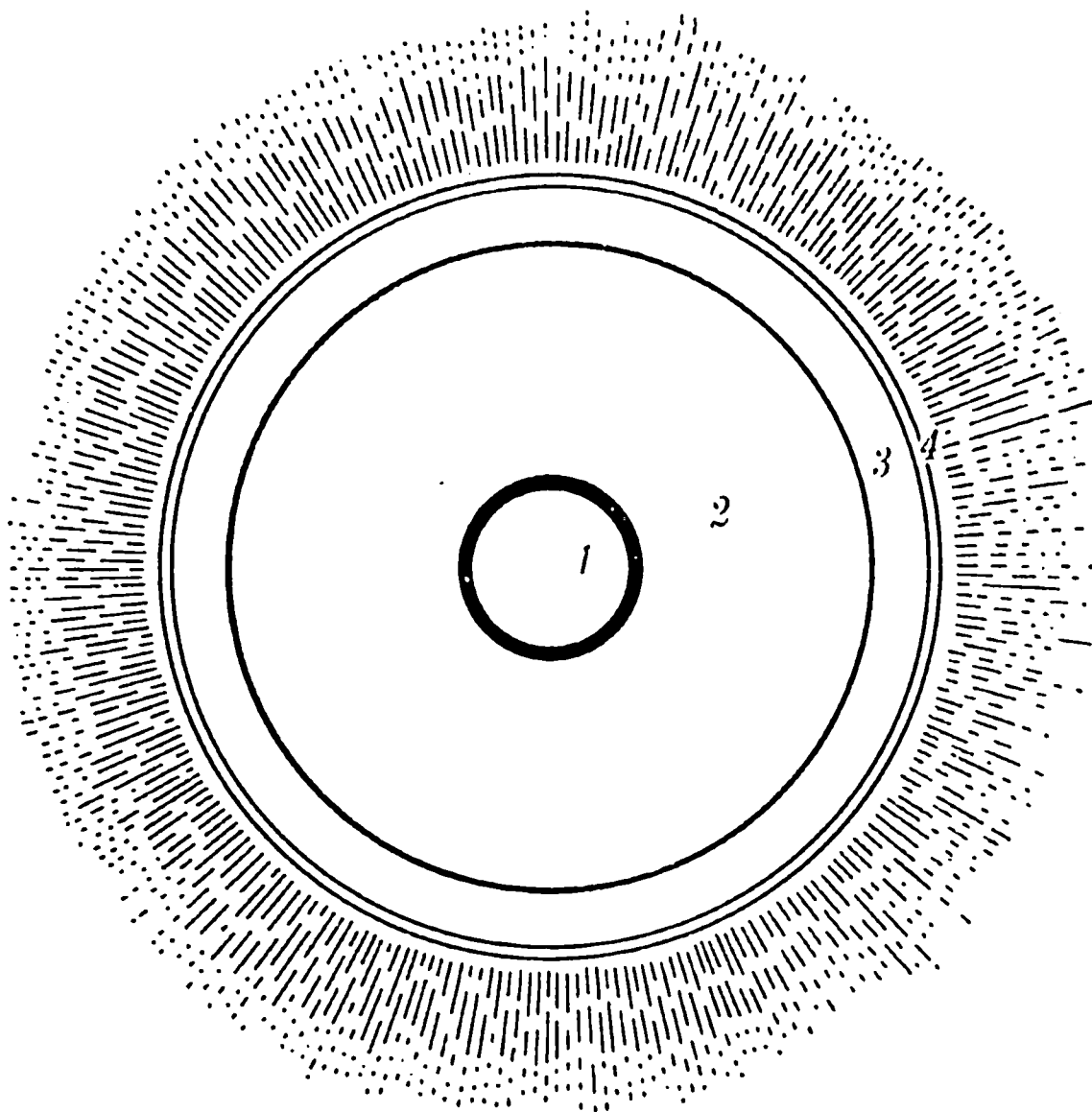


Рис. 5. Внутреннее строение звезды солнечного типа
 1 — ядро, 2 — конвективная зона, 3 — зона ионизации,
 4 — зона нейтрального водорода

около 60 млн. лет просачиваются, наконец, в фотосферу Солнца и уходят прочь.

В центральных областях Солнца отвод энергии ведется излучением. По мере перехода к наружным слоям, где давление меньше, температура понижается и на глубине от 200 000 до 300 км падает с миллиона до нескольких сотен тысяч градусов. В этой зоне, называемой зоной ионизации, происходит важный физический процесс: если в глубоких слоях Солнца атомы водорода ионизованы, то здесь они могут стать нейтральными, т. е. приобрести недостающий электрон. Атом водорода то ионизуется, поглощая кванты ультрафиолетового излучения, то становится нейтральным, отдавая энергию. В связи с этим уменьшается роль передачи энергии излучением и возрастает роль конвекции. Зону ионизации (рис. 5) энергия проходит всего за 20 суток и вступает в следующую зону, где преобладают уже нейтральные атомы водорода. Ее

верхняя граница и есть фотосфера Солнца. В этом слое толщиной около 300 км роль излучения в передаче энергии наружу снова становится главной. Большинство квантов, переизлучившись в фотосфере несколько раз, покидает Солнце. Образованный ими спектр Солнца мы и наблюдаем.

Физика звезд

Кроме Солнца и сходных с ним звезд есть более горячие и более холодные, принадлежащие, как и Солнце, к главной последовательности, а также красные гиганты, сверхгиганты и белые карлики (табл. 2). Изучение звездной эволюции, т. е. строения звезд и их изменений со временем, показало, что есть две важнейшие характеристики звезды, которые определяют ее судьбу: возраст и длительность существования, температуру и размеры, светимость и даже поколение, к которому она принадлежит. Первая характеристика — масса звезды, от нее зависит большинство физических свойств звезды, другая — ее химический состав, т. е. процентное содержание водорода, гелия и более тяжелых элементов; оно указывает на возраст и поколение звезды и уточняет остальные свойства.

Пока удалось измерить массы только у тех двух сотен двойных звезд, у которых прослежены орбиты спутников относительно главной звезды и точно измерены длины больших полуосей этих орбит. Интересно, что по массам звезды различаются не так сильно, как по светимостям и радиусам. Наиболее массивные звезды главной последовательности лишь в 50—75 раз превосходят массу Солнца, зато по светимости они больше его в десятки тысяч, а по радиусам — в сотни раз. Слабейшие карлики по светимости слабее Солнца в тысячи раз, размерами — в сотни раз меньше Солнца, а по массам составляют всего десятую долю массы Солнца. И все-таки 750-кратного различия звезд по массам оказывается достаточно, чтобы характеры и судьбы их были удивительно различны.

Уже в звездах главной последовательности различие в массах приводит к существенному различию в структуре звезд и их размерах. Решающее влияние массы связано с условиями механического и теплового равновесия звезды. Чем больше масса, тем большее газовое давление нужно в ее центральной области для уравнивания тя-

Таблица 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕЗД РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ И СВЕТИМОСТЕЙ (массы и радиусы — в долях массы и радиуса Солнца)

Спектральный тип	Звездные последовательности											
	Главная				Гиганты				Сверхгиганты			
	абсолютная звездная величина, m	масса	радиус	температура, $^{\circ}\text{K}$	абсолютная звездная величина, m	масса	радиус	температура, $^{\circ}\text{K}$	абсолютная звездная величина, m	масса	радиус	температура, $^{\circ}\text{K}$
O5	-6	50	18	50000	—	—	—	—	—	—	—	—
B0	-4	17	7,5	33000	—	—	—	—	-6	50	20	30000
A0	1	3	2,6	11000	—	—	—	—	-7	16	40	9000
F0	3	2	1,4	7600	—	—	—	—	-8	12	60	6500
G0	5	1	1,0	6000	1	2,5	6	5300	-8	10	100	5000
K0	6	0,8	0,8	5200	1	3,5	16	4200	-8	13	200	3800
M0	9	0,5	0,6	3500	0	5	60	3300	-7	17	500	3200
M9	17	0,1	0,1	2000	-1	6	—	1600	—	—	—	—

готения газовых масс к центру и тем выше там температура и больше вырабатывается термоядерной энергии за секунду. Но звезда находится еще и в тепловом равновесии: она должна отдавать во внешнее пространство столько энергии, сколько ее выработалось в центре за равное время. Это тепловое равновесие, как мы уже видели в случае Солнца, поддерживается комбинацией двух способов передачи энергии: излучением и конвекцией.

Чтобы поддерживалась постоянная энергетическая отдача или, другими словами, светимость, в звезде должны отрегулироваться размеры излучательной и конвекционной зон, должен установиться такой радиус, чтобы возникло и механическое и тепловое равновесие. Если звезда излучает тепла больше, чем вырабатывает, ее радиус уменьшается, а это повышает давление в центре и увеличивает отдачу термоядерной энергии, пока она не устанавливается на уровне, обеспечивающем оба равновесия.

В случае самых массивных звезд типов O и B условия равновесия приводят даже ко взаимной перестановке конвективной и излучательной зон: в центре образуется конвективная зона, окруженная протяженной излучательной, переходящей затем в фотосферу (поверхностная температура таких звезд высока, и зоны, где атомы водорода становятся нейтральными, у них нет).

Заметим, что из необходимости соблюдения в звезде как механического, так и теплового равновесия вытекает вза-

имосвязь масс и светимостей звезд главной последовательности: светимость пропорциональна массе звезды в третьей степени. Такая зависимость сначала была предсказана, а затем и обнаружена по измеренным массам и светимостям звезд.

Белыми карликами были названы звезды, у которых при массах, обычных для большинства звезд (т. е. звезд главной последовательности), радиусы чрезвычайно малы и поэтому чудовищно велики плотности звездного вещества. Вследствие этого расстояния между атомами газа белых карликов в несколько десятков раз меньше, чем в жидких или твердых веществах! Такой необычный газ называется вырожденным газом. Он обладает свойствами, отличающимися от свойств обычного газа. В частности, давление такого газа мало зависит от температуры, но зато сильно зависит от плотности. Вследствие этого для белого карлика тепловое равновесие не играет такой важной роли, как в обычных звездах, но сохранение механического газового равновесия между силой тяготения и давлением имеет важное значение.

У белых карликов нет взаимосвязи между массой и светимостью, которая характерна для звезд главной последовательности, но зато есть соотношение между массой и радиусом: чем больше масса, тем меньше радиус белого карлика. Расчеты показывают, что для масс порядка $1,43M_{\odot}$ радиус белого карлика уменьшается до нуля. Следовательно, столь массивные белые карлики уже невоз-

можны, так как давление вырожденного газа в них не в состоянии уравновесить тяготение массы звезды.

По внутреннему устройству белые карлики просты. У них большое ядро из вырожденного газа с мало изменяющейся в глубину температурой. Это «изотермическое» ядро снаружи окружено тонким слоем обычного звездного газа. На границе этих двух зон могут быть условия для термоядерных реакций, если в карлике не выгорел весь водород, а температура для этих реакций достаточно высока. Но существуют белые карлики (например, звезда ван Маанена), у которых температура изотермического ядра ниже 6 млн. градусов, и термоядерные реакции в них не идут. В этом случае белый карлик может долго светиться за счет охлаждения: запас тепловой энергии в нем еще огромен, обычный газовый слой плохо проводит тепло излучением, поэтому потери энергии на свечение сравнительно невелики.

А как устроены красные гиганты? Устройство их весьма сложно. По современным представлениям в центре такой звезды находится массивное изотермическое ядро из вырожденного газа, т. е. по существу горячий белый карлик с температурой в несколько десятков миллионов градусов. Но в отличие от белого карлика изотермическое ядро гиганта окутано не тонким слоем обычного газа, а обширной разреженной газовой оболочкой. Она имеет несколько зон. Ядро и небольшая внутренняя зона, прилегающая к ядру, имеют температуру, достаточную для протекания в них не только реакций превращения водорода в гелий, но и других реакций ядерного горения вплоть до образования ядер атомов железа. Следующая зона излучательного переноса энергии снижает температуру слоев до 1 млн. градусов. За ее пределами располагается разреженная конвективная оболочка — «шуба» красного гиганта, на которую приходится около 90% радиуса звезды, и на ее поверхности температура снижается до нескольких тысяч градусов. Этой низкой температуре фотосферы гигант и обязан своим красным цветом.

Рождение и эволюция звезд

О самой начальной стадии звезд мы знаем очень мало. Существуют лишь гипотезы, использующие комплекс сведений о звездах, межзвездной среде и законы физики. Са-

мая разработанная и, по-видимому, близкая к истине — гипотеза образования звезд из межзвездной среды.

Согласно этой гипотезе, самые старые звезды (звезды «первого поколения») — ровесники нашей Галактики — произошли из сгустков ее газового облака, состоявшего почти целиком из водорода и некоторой примеси гелия. Звезды же последующих поколений, более молодые, формировались из межзвездного газа и пыли, содержащих уже и другие элементы, родившиеся в ходе ядерных реакций и взрывов в звездах, и выброшенных ими в межзвездную среду. Очень вероятно, что и в настоящее время звезды продолжают возникать в холодных областях плотных межзвездных газовых облаков. Возможно, что некоторые звезды рождаются в плотных сгустках газа и пыли, называемых глобулами, которые наблюдаются на фоне светлых газовых туманностей как круглые темные зерна. Размеры глобул составляют от 0,06 до 8 пс, а массы — от 0,002 до $13 M_{\odot}$.

Ранний период развития звезд в общих чертах сходен для всех звезд. Под действием тяготения к центру газового сгустка («протозвезды») потенциальная энергия газовых частиц его внутренних слоев переходит в кинетическую и протозвезда начинает светиться за счет энергии гравитационного сжатия. Естественно, что, чем массивнее звезда, тем она быстрее сжимается под действием собственного тяготения. Длительность этой стадии выражается формулой

$$t_0 = 50 M/L \text{ млн. лет,}$$

где M и L — масса звезды и ее светимость в долях солнечной массы и светимости. Интересно, что у самых малых звезд с массами менее $0,3 M_{\odot}$ длительность стадии сжатия превосходит возраст нашей Галактики, т. е. они еще не закончили своего сжатия, хотя и начали его в числе первых.

Сжатие создает условия для возникновения в центральной части молодой звезды ядерных реакций. Выделяемая в результате «горения» водорода энергия повышает газовое давление в звезде, и сжатие останавливается. Таким образом, гравитационное сжатие, затопив термоядерную печь звезды, сменяется «ядерным веком» — реакциями горения водорода. Скорости течения ядерных реакций очень

сильно зависят от температуры. Поэтому в массивной звезде реакция горения водорода идет быстрее, выше ее светимость и температура как в центре, так и на поверхности. На диаграмме Герцшпрунга—Рессела это характеризуется тем, что звезды с различными массами в момент начала ядерного века имеют различные абсолютные величины и спектральные типы. Все вместе они образуют знакомую нам главную последовательность на диаграмме. Таким образом, стадия главной последовательности — это период жизни звезды за счет горения в ее недрах водородного горючего. Если светимость звезды L и ее массу m выразить в долях солнечной светимости и массы, то длительность «водородного века» звезды выразится такой формулой:

$$t_B = 11 M/L \text{ млрд. лет.}$$

В ходе переработки водорода в гелий в центре звезды накапливаются ядро из гелия, а также некоторое количество азота с примесью углерода и кислорода. Зона ядерной реакции перемещается на периферию ядра. Чтобы температура в этой области была достаточна для поддержания реакции, на время снова подключаются силы гравитационного сжатия. Внутренние слои сжимаются, а наружная оболочка расширяется. Звезда превращается в красный гигант, совершая скачок с главной последовательности вверх—вправо.

Как только истощается водород на периферии звездного ядра, звезда снова начинает сжиматься, пока в ее центре не будет достигнута температура в сотни миллионов градусов. При такой температуре начинает идти реакция превращения гелия в углерод и изотопы кислорода, неона и магния. «Гелиевый век» звезды также сравнительно длителен, но примерно в десять раз короче основного, водородного.

Самые массивные звезды — сверхгиганты — имеют еще и последующие стадии: после израсходования гелия ядро звезды сжимается и повышает центральную температуру до миллиарда градусов. Тогда горючим для звезды становятся углерод и другие элементы, и в ходе реакций теперь начинают образовываться кремний, сера, аргон и кальций. И еще раз наступает момент, когда в звезде включается механизм сжатия: это когда сгорит углерод и нужно будет поднять температуру в центре звезды до

трех миллиардов градусов. В этой стадии горят уже кремний и получившиеся вместе с ним элементы, а образуются элементы группы железа. На этом ядерная эволюция в звезде завершается: ядерные реакции образования более тяжелых, чем железо, элементов энергию уже не выделяют, а поглощают. Наступает финальная стадия звезды, когда сжатие может продолжаться неограниченно. О финальной стадии мы будем говорить в конце книги. Длительность углеродной и других стадий коротка по сравнению с водородной и гелиевой. А у обычных звезд, не сверхгигантов, таких стадий не бывает, потому что не хватает энергии сжатия для столь высоких температур, какие нужны для «загорания» углерода и более тяжелых элементов.

Наша Галактика

Мы уже говорили, что наше Солнце входит в состав большого облака звезд — в Млечный Путь или Галактику. Поскольку расстояния между соседними звездами, не считая двойных, огромны, в среднем около полутора парсеков, то мы, находясь внутри этой звездной системы, видим на небе невооруженным глазом несколько тысяч звезд, которые вследствие перспективы выглядят хаотически разбросанными по небу. Но более слабые и далекие звезды, доступные только телескопам, распределяются по небу не так беспорядочно: чем ближе участок неба к Млечному Пути, тем он богаче звездами. Млечный Путь как бы рассекает небо на две полусферы, и это сечение представляет собой плоскость симметрии нашей звездной системы (она называется галактической плоскостью), вблизи которой находится и наше Солнце.

Большинство звезд, входящих в Галактику (в том числе и двойные), являются ее самостоятельными членами, но некоторая часть образует коллективы от нескольких десятков до десятков тысяч членов. Эти звездные группы называются звездными скоплениями. По внешнему виду наблюдаются две разновидности скоплений: рассеянные и шаровые. У рассеянных скоплений видимые очертания нечеткие, они выделяются на фоне остальных звезд Галактики сгущениями самых ярких звезд, а центральная зона между яркими звездами, заселенная карликами, не всегда заметна. У шаровых же скоплений совсем нет яр-

ких горячих голубых звезд, и самые яркие в них красные гиганты. Звезды в шаровых скоплениях расположены густо, и число их возрастает к центру скопления. Разница между рассеянными и шаровыми скоплениями заключается также и в их возрасте. Различия звезд одного и того же спектрального типа по массам, светимостям, химическому составу, характеру движения, а также существенная разница в распределении этих видов скоплений в Галактике — все это тоже последствия «разницы лет».

Действительно, теория звездной эволюции показывает, что рассеянные скопления намного моложе шаровых. Около тысячи известных теперь рассеянных скоплений видны на небе в Млечном Пути или возле него, а их пространственное размещение в теле нашей Галактики — тонкий слой около галактической плоскости — очерчивает дискообразную форму Галактики. Шаровые же скопления — почти ровесники Галактики. Они видны на небе не только вблизи Млечного Пути, но и в далеких от него районах неба. Их найдено уже 120. Размещаются они в пространстве сферическим роem с повышением концентрации к центру роя и сами образуют как бы шаровое скопление из скоплений.

Сферическая форма размещения шаровых скоплений — пространственное распределение их, как принято говорить у астрономов, — это следы бывшей формы нашей Галактики.

Строение Галактики выяснилось не сразу. Когда в 1918 г. американский астроном Х. Шепли изучил, как расположены шаровые скопления, то обнаружилось, что центр симметрии их распределения в пространстве (т. е. центр тяжести, вокруг которого они располагаются) не совпадает с Солнцем, а находится от него на значительном расстоянии — в направлении созвездия Стрельца, где находится яркая часть Млечного Пути. Это было важное открытие. Раньше астрономы считали, что если Млечный Путь опоясывает наше небо сплошным поясом без разрывов, то Солнце находится близко к центру Галактики. В действительности же оно оказалось ближе к периферии нашей звездной системы.

По современным данным, расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 10 кпс, а наружный край ее находится от нас на расстоянии 6 кпс.

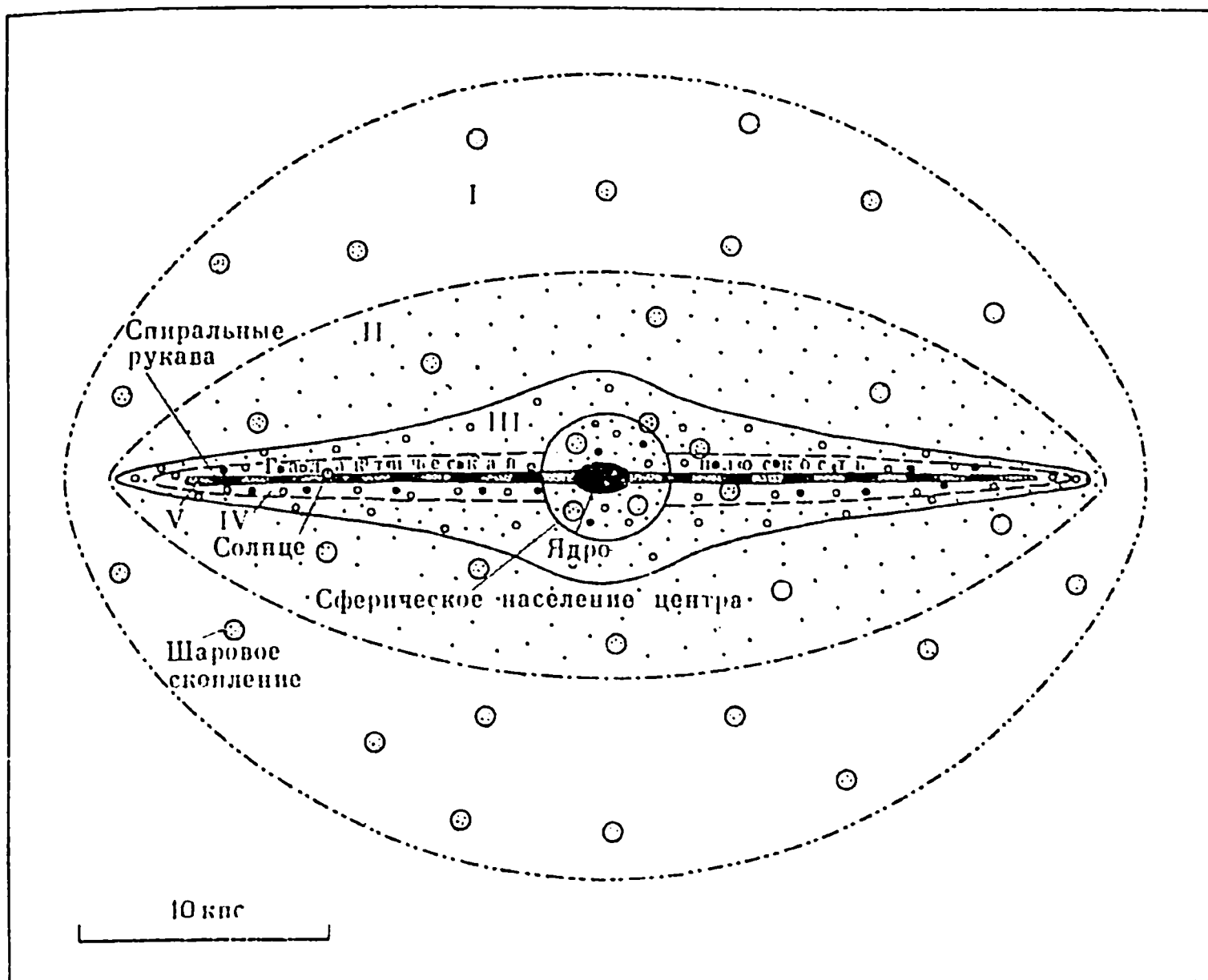


Рис. 6. Строение галактики

I — гало, *II* — промежуточная сферическая подсистема, *III* — диск, *IV* — плоская старая подсистема, *V* — плоская молодая подсистема

Далее обнаружилось, что звезды участвуют во вращении Галактики. Ось вращения звездной системы перпендикулярна к галактической плоскости и проходит через центр Галактики. С галактическим вращением связана и чечевичеобразная форма Галактики (рис. 6). Если предположить, что Солнце в своем движении вокруг центра Галактики описывает окружность, то ее длина будет около 63 кпс, а время полного оборота по галактической орбите — около 300 млн. лет. Чтобы представить себе такой отрезок времени, напомним, что триста миллионов лет назад на Земле растительная и животная жизнь еще только выходила из океанских глубин на сушу (девонский период палеозойской эры)!

А вот каковы размеры Галактики: ее радиус — 16 кпс, толщина (если считать ее сплюснутой чечевичей) — 3 кпс, объем — около 2600 куб. кпс. Масса Галактики, вычисленная по закону вращения, — около 250 млрд. $M_{\odot}$ (масс

Солнца). Это, конечно, не значит, что в Галактике насчитывается 250 млрд. звезд. Как известно, наиболее часто встречаются звезды со светимостью, в сто раз меньшей солнечной, и соответственно с массой, в десять раз меньшей, чем масса Солнца. Таким образом, число звезд в Галактике — около двух триллионов ($2 \cdot 10^{12}$).

Вне звезд находится около 2% массы нашей звездной системы. Это межзвездный газ с незначительной примесью пыли. Основная масса газа холодная, и лишь небольшая его часть нагрета горячими звездами и светится в виде газовых туманностей. Свечение их сосредоточено в основном в линиях водорода. Линии второго распространенного элемента — гелия — слабы, зато очень ярки некоторые линии других элементов. Дело в том, что высокая разреженность межзвездного газа создает условия для свечения в таких спектральных линиях, в которых в обычных плотных звездных атмосферах свечение подавлено или, как говорят, запрещено. Такие запрещенные линии обнаруживаются только в спектрах сильно разреженных газов — будь то лабораторный вакуум, солнечная корона, ионосфера Земли или газовая туманность.

Сам межзвездный холодный газ почти прозрачен для видимого излучения звезд и обнаруживается появлением в спектрах горячих звезд «лишних» линий поглощения, свойственных не горячим газам звездных атмосфер, а более холодным газам межзвездной среды (см. подпись к рис. 3).

Детальное исследование межзвездного газа стало возможным благодаря открытию радиоизлучения межзвездного газа. Сильное радиоизлучение было обнаружено у горячих газовых туманностей. По характеру оно аналогично излучению газа при температуре около 10 тыс. градусов, которую имеют эти туманности. Холодный же межзвездный газ должен иметь небольшое радиоизлучение, не превосходящее излучения тела, нагретого всего до 100°K .

Однако радиоизлучение межзвездной среды оказалось значительно большим. Оно создано космическими лучами в магнитном поле Галактики. Космические лучи — это электроны, протоны и другие элементарные частицы, мчащиеся со скоростями, близкими к скоростям света. Когда такой электрон попадает в магнитное поле, он начинает двигаться по спирали и расходовать свою энергию на излучение (рис. 7). Это излучение распространяется

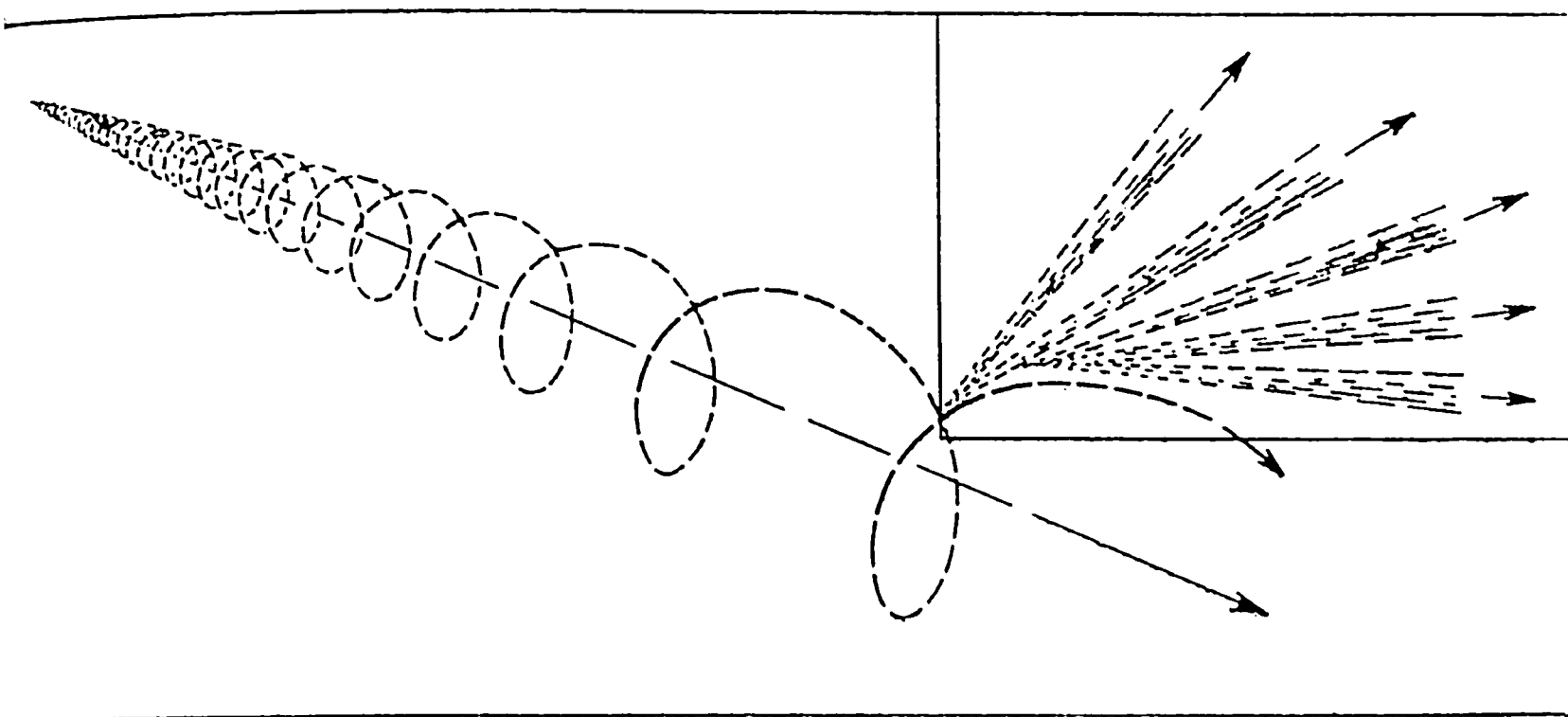


Рис. 7. Синхротронное излучение

Заряженная элементарная частица, обладающая релятивистской скоростью, движется в магнитном поле по спирали и излучает в узком пучке, направленном по касательной к траектории частицы

в узком пучке, ось которого касательна к траектории электрона. Такое явление и его свойства были изучены физиками в магнитном поле ускорителя элементарных частиц, называемого синхротроном. Поэтому и излучение, возникающее в подобных условиях, получило название синхротронного. Его свойства отличаются от свойств теплового излучения, возникающего в телах вследствие их нагревания, поэтому синхронное излучение называют разновидностью нетеплового излучения.

Важнейшим средством изучения межзвездной газовой среды служит сильное излучение межзвездного водорода в спектральной линии на волне 21 см, обнаруженное радиоастрономией. Изучение размещения водорода по силе излучения и доплеровскому смещению этой спектральной линии позволило проследить ход спиральных рукавов Галактики на значительном протяжении, а по движению водорода изучить вращение нашей звездной системы около ее центра и узнать многое о центральном сгущении газа в Галактике.

О том, что в нашей Галактике имеются газовые спиральные рукава, подобные спиральным рукавам многих других звездных систем, астрономы догадывались на основании изучения размещения светлых газовых туманностей, окружающих горячие звезды. Но эти туманности легко об-

наруживались только в близких окрестностях нашего Солнца — на расстояниях в 2—3 кпс. К тому же контуры спиральных рукавов замаскированы сильным межзвездным поглощением света в Млечном Пути, где они расположены.

Радиоастрономические исследования спиральных рукавов нашей Галактики не встретили подобных затруднений.

Теперь известно, что спиральные рукава представляют собой распространяющиеся из центра Галактики волны уплотнения межзвездного газа. Звезды Галактики, принимая участие в ее осевом вращении, попадают в эти газовые уплотнения и несколько тормозятся в межзвездной среде, но со временем они покидают рукава, продолжая пути по своим галактическим орбитам, а волна уплотнения продолжает свое движение от центра к периферии.

Центральное сгущение звезд Галактики — ее ядро — закрыто от нас густыми слоями межзвездной пыли, которая ослабляет его свет в 1500 и более раз. Поэтому обнаружить ядро и изучать его стало возможным лишь с помощью инфракрасной техники и радиоастрономии. Было найдено, что ядро Галактики служит сильным источником синхротронного радиоплучения. Вокруг самой сердцевинны ядра найдено удивительное по свойствам облако, которое вращается по необычному для газовых тел закону — так, как будто это не газовый сгусток, а твердый диск.

В 1943 г. В. Бааде, работавший в США, и Б. В. Кукаркин обнаружили, что звезды и газовые туманности Галактики по своим разнообразным свойствам подразделяются на несколько типов населения или на «подсистемы». При этом Бааде исходил из изучения звезд в туманности Андромеды, а Кукаркин, исследуя классы физических переменных звезд, подразделил их на плоскую, промежуточную и сферическую подсистемы.

Теперь принято считать, что население нашей Галактики образует пять подсистем. Эти подсистемы или типы звездного населения различаются между собой характером объектов, их размещением в Галактике, типичными скоростями движения, химическим составом и возрастом.

Именно возраст служит главным различием подсистем (табл. 3). Самая древняя подсистема — «гало» или сферическая. Она образовалась еще тогда, когда газовое облако Галактики распадалось на отдельные сгустки. Следующая подсистема промежуточная сферическая. Далее идет промежуточная подсистема, называемая населением диска. Это самая массивная и многочисленная по звездам подсистема, образующая главное тело Галактики, ее «линзу». К ней относятся яркие красные гиганты, новые звезды, а главную его массу составляют звезды, подобные нашему Солнцу. Наконец, есть две «плоские» подсистемы: старая или промежуточная плоская подсистема и

Таблица 3
ЗВЕЗДНЫЕ ПОДСИСТЕМЫ ГАЛАКТИКИ

Звездная подсистема	Главное звездное население (наиболее заметные элементы) подсистемы	Толщина подсистемы, доли диаметра Галактики	Степень концентрации звезд к центру системы	Распределение населения в подсистеме	Процент гелия по массе	Возраст объектов подсистемы, млрд. лет	Масса подсистемы, млрд. масс Солнца
Сферическая (гало)	Шаровые скопления, субкарлики, короткопериодические цефеиды	1 : 1	Сильная	Равномерное	0,3	14—12	57
Промежуточная сферическая	Звезды-«бегуны», долгопериодические переменные	1 : 2	»	»	1	12—7	} 168
Промежуточная — диск	Звезды со слабыми линиями металлов, планетарные туманности, новые звезды, красные гиганты	1 : 5	»	»	2	7—2	
Плоская старая	Звезды с сильными линиями металлов, типов А—М	1 : 20	Слабая	Клочковатое	3	1,5—0,1	18
Плоская молодая	Сверхгиганты, горячие звезды типов О и В, звезды Т Тельца, газ и пыль	1 : 100	»	Клочковатая, спиральная структура	4	0,1	7

Молодая плоская подсистема. К последней относятся горячие звезды-сверхгиганты, долгопериодические цефеиды и звездные скопления, содержащие горячие звезды, пыль и межзвездный газ. Это молодое звездное население располагается точно в галактической плоскости и образует спиральные рукава.

Как шла эволюция нашей Галактики, мы рассмотрим после того, как познакомимся с другими типами звездных систем.

Другие галактики

За порогом Галактики начинается удивительный мир бесчисленного множества звездных систем, одной из которых — не самой маленькой, но и не самой большой — является и наша Галактика. С переходом к более слабым по видимой величине галактикам их число на небе быстро возрастает. Так, галактик ярче 12-й звездной величины известно около 250, галактик 15-й величины — уже около 50 000, а число галактик, которые могут быть сфотографированы с самыми крупными телескопами, составляет многие миллиарды.

Все звездные системы, расположенные вне нашей, называются просто галактиками или внегалактическими туманностями, потому что многие из них были еще в прошлом веке обнаружены как туманности и внесены в списки, каталоги, наравне с настоящими газовыми туманностями, звездными скоплениями и галактиками. Наиболее известны каталог более ста ярких туманностей, составленный Мессье, и «Новый каталог» Дрейера, насчитывающий вместе с дополнительными списками почти десять тысяч туманностей. Туманность Андромеды, например, в этих каталогах имеет обозначения М 31 и NGC 224.

При знакомстве со звездными системами бросается в глаза чрезвычайное разнообразие форм галактик. По наиболее характерным признакам их удается подразделить на несколько основных типов.

Около 25% галактик имеют особенно простую — круглую или эллиптическую — форму (рис. 8). Это — эллиптические галактики, их символ — Е. В зависимости от сжатия формы различают восемь подтипов эллиптических галактик — от сферических Е0 до чечевицеобразных Е7

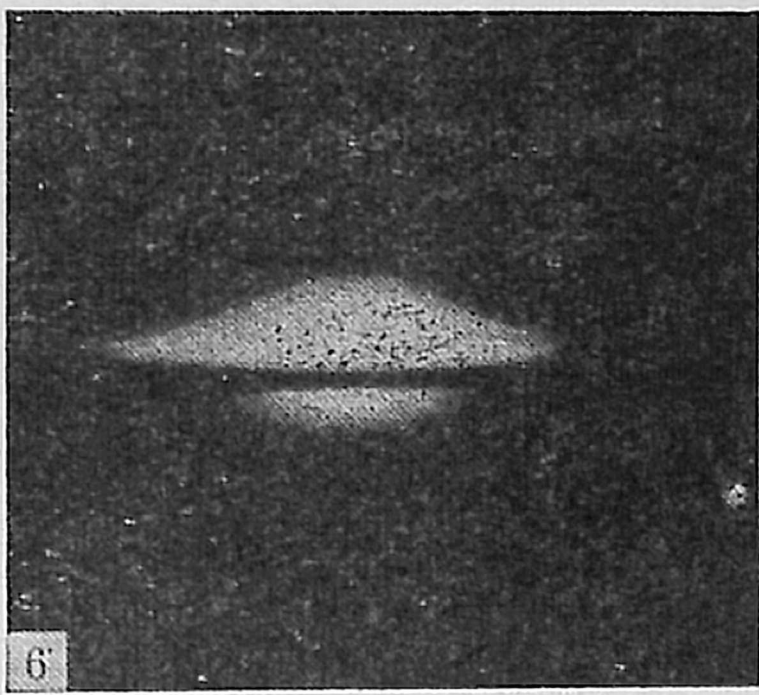
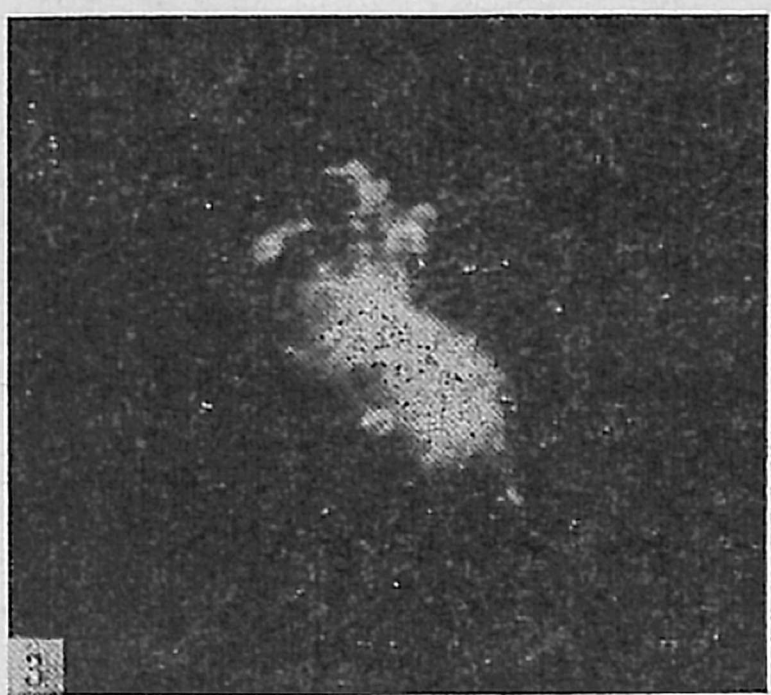
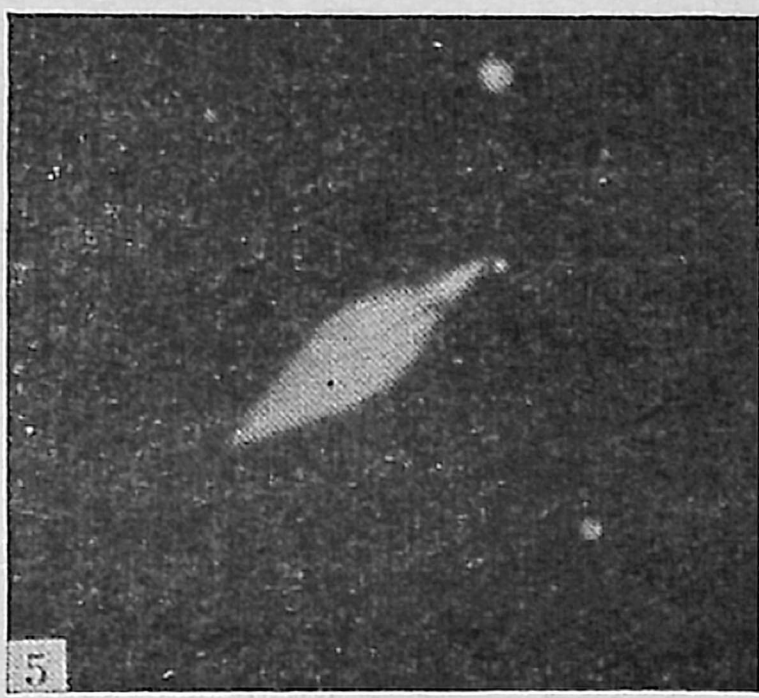
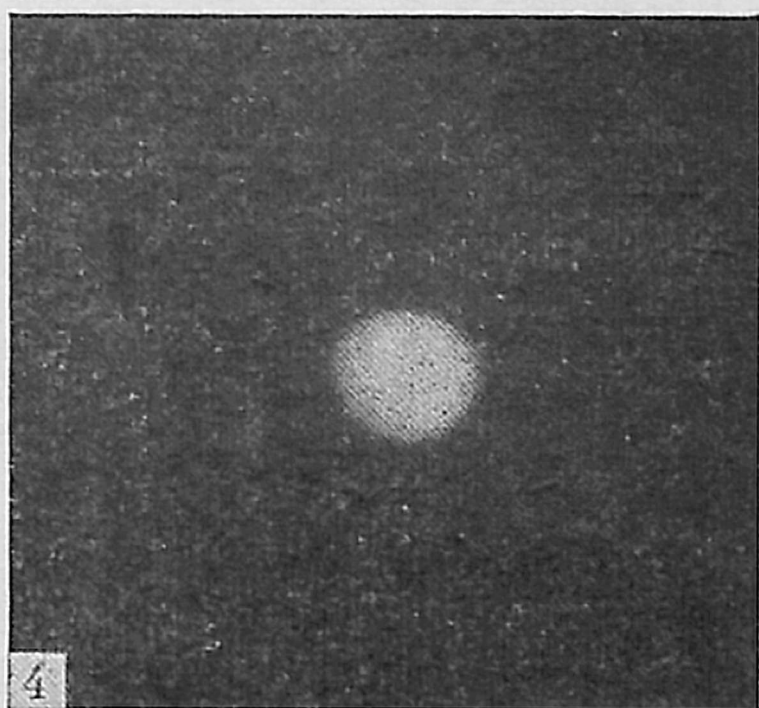


Рис. 8. Основные типы галактик:
1 — Sb, 2 — Sc, 3 — Im 4 — E, 5 — SO, 6 — Sa

(цифра указывает степень сжатия). Эти галактики наиболее просты по структуре, звездному составу и характеру внутренних движений. Расширение линий в спектрах эллиптических туманностей указывает на то, что звезды в них движутся в самых произвольных направлениях со скоростями порядка 200 км/сек. Распределение звезд в них во всех направлениях от центра симметрии почти равновероятно; это и объясняет плавность изменения яркости и эллиптичность формы галактик. Горячих сверхгигантов в них нет, самые яркие звезды — красные гиганты, подобные встречающимся в шаровых скоплениях.

Самый распространенный тип галактик (50%) — уже знакомые нам по нашей звездной системе спиральные галактики (символ S). Примерно у половины их рукава начинаются сразу от ядра, а у остальных ядро пересекается газовой перемычкой, от концов которой и начинаются рукава. По относительным размерам ядра и диска обе разновидности подразделяются на подтипы a, b, c и d (размеры ядра убывают от a к d).

Наша Галактика скорее всего является спиральной типа Sb.

Примерно 20% галактик относится к типу S0, промежуточному между эллиптическими и спиральными типами, но все же ближе к первым. В галактиках этого типа яркость от центра падает уже ступеньками.

Всего 5% галактик относится к неправильным (символ I), т. е. не имеющим симметрии в форме. Это — пестрый по представителям тип галактик. Одни — неправильные галактики типа Магеллановых Облаков (символ Im) — предельный случай спиральных без центрального сгущения. Другие имеют характеристики и эллиптических и спиральных (символ Io).

Специальным классом галактик являются так называемые взаимодействующие галактики со следами воздействия друг на друга, выражающимися в искажении формы, перемычках между галактиками и т. д.

Богатство форм звездных систем объясняется разнообразием условий, в каких они рождались. А возникновение галактик было в конечном счете некоторым этапом развития Вселенной. Расширение Вселенной, о котором будет сказано в следующем разделе, и выводы ядерной физики свидетельствуют о том, что эпохе галактик предшествовали более ранние стадии развития, когда все вещество

Вселенной находилось в горячем состоянии, имело огромную плотность и было равномерно сосредоточено в небольшом пространстве.

По каким-то причинам в этом состоянии произошел взрыв и начался разлет вещества, расширение Вселенной. С этого момента и начинается отсчет ее возраста. Расширение сопровождалось понижением плотности вещества и температуры. В течение первой секунды расширения Вселенной температура снизилась с десяти триллионов до десяти миллиардов градусов. Первая секунда была целой эпохой существования Вселенной, в течение которой шли взаимодействия частиц и античастиц, рождавшихся и погибавших с образованием нейтрино и световых квантов. Эту секунду пережили немногие виды элементарных частиц. Следующей была стосекундная эпоха ядерных реакций. В эту эпоху образовались ядра водорода (70% массы вещества Вселенной) и гелий (30%); их смесь представляла собой еще горячую плазму, которая стала медленно остывать.

Скоротечные эпохи развития Вселенной на этом закончились, новые эпохи стали длиться миллионы лет. За первый миллион лет температура вещества снизилась до 3500° , образовались нейтральные атомы гелия и водорода. Это разреженное газовое облако распалось на отдельные облака различной массы. Одни из них имели центральные сгущения, вокруг которых вращался остальной газ. Из них и получились спиральные галактики. Другие не имели вращения и положили начало эллиптическим галактикам. Третьи имели вращение, но без значительного центрального сгущения. Так образовались неправильные галактики типа Im. Особенности других типов неправильных галактик возникли, по-видимому, в результате внутренних взрывов в них.

Первоначальные газовые облака, быстро охлаждаясь, в свою очередь также распадались на отдельные сгущения. Сгущения двигались с большой скоростью и в самых разных направлениях. Из этих сгущений образовались звезды первого поколения и шаровые звездные скопления. Следовательно, рой быстрых звезд и шаровых скоплений — это остаток первоначальной сферической формы нашей Галактики. После того как в галактиках образовались звезды, их дальнейшее развитие шло по-разному, в зависимости от массы (в массивных галактиках эволюция

идет быстрее) и от вращения галактик: системы с быстрым вращением развились в тип Sc, со средним — в Sb, а с небольшим — в тип Sa.

Первое поколение звезд нашей Галактики имело разный по длительности век: звезды малой массы существуют и сейчас, а более массивные прожили свою жизнь быстро.

В отличие от звезд, сохраняющих почти неизменным характер своих движений с начала существования, межзвездный газ находится под сильным воздействием тяготения звездной системы и, участвуя в ее вращении, опускается к главной плоскости галактики и сжимается к ее центру. Это, согласно закону сохранения момента вращения, усиливает вращение плоской составляющей галактики. В местах, где плотность газа оказывается высока, он превращается в звезды следующего поколения. Полному превращению всего газа спиральных галактик в звезды препятствуют их магнитные поля.

Образование молодых звезд идет также в ядре галактики: к ее центру опускается газ, потерявший момент вращения. Здесь рождаются звезды новых поколений сферической подсистемы, составляющей ядро галактики. Однако здесь нет условий для образования массивных звезд, так как газ образует небольшие плотные сгустки. В случаях же, когда газ сжимается в массивное тело, равное тысячам солнечных масс, процесс завершается, по-видимому, катастрофой: вместо устойчивой звезды получается сжатие, приводящее к высокой центральной плотности и образованию радиоактивных изотопов со взрывным характером выделения энергии. Следует сильный взрыв, и сферическая волна газа устремляется во все стороны из галактического ядра. Некоторые ученые считают, что такой взрыв произошел около десяти миллионов лет назад в центре галактики М 82, в результате чего она стала неправильной типа I₀. Расширяющийся рукав нашей Галактики также, по-видимому, является остатком такого взрыва.

В эллиптических галактиках путь эволюции проще. В них с самого начала не было систематического галактического вращения и заметного магнитного поля. Весь газ в этих системах с самого начала превратился в звезды сферической подсистемы. Газ же, выбрасываемый звездами в ходе их эволюции, опускается к центру системы, где могут поэтому рождаться звезды новых поколений.

Но в эллиптических галактиках чрезвычайно массивных звезд нет, поэтому общий процесс звездной эволюции идет намного медленнее, чем в спиральных. Конечно, и в эллиптических галактиках одновременно сосуществуют звезды различных поколений, но между ними нет такой резкой разницы в характере движения, химическом составе и массе, какая наблюдается в спиральных галактиках.

В неправильных галактиках типа Магеллановых Облаков процесс образования звезд тянулся очень долго и, по-видимому, еще не закончился.

Общей тенденцией эволюции галактик, таким образом, является продолжающийся процесс образования звезд новых поколений в центре и в спиральных рукавах. Но в ходе эволюции все большая часть газа консервируется в карликах и надолго исключается из общего кругооборота. Образование новых поколений идет поэтому все медленнее и в меньших масштабах. В этом заключается старение галактик.

Мир галактик

Взглянем теперь на галактики с другой точки зрения. В современной астрономии не менее важным оказался вопрос о взаимных расположениях и движениях галактик, так как изучение его пролило свет на самые общие свойства и эволюцию Вселенной. Мы начнем знакомство с этим аспектом мира галактик с важной проблемы внегалактической астрономии — с определения расстояния до галактик.

Как мы уже знаем, благодаря тому, что в ближайших галактиках были найдены цефеиды, новые звезды и сверхгиганты, удалось установить расстояния до ближайших звездных систем. В 1912 г. американский астроном В. Слайфер обнаружил замечательное свойство туманностей, оказавшихся позже внегалактическими. В спектрах этих далеких галактик все спектральные линии оказались смещенными к красному концу по сравнению с такими же линиями в спектрах источников, неподвижных относительно наблюдателя. Отношение смещения линии $\lambda - \lambda_0$ к длине волны λ_0 оказывается для всех линий в спектре данной галактики одинаковым и называется красным смещением. Аналогичное свойство, согласно принципу Доплера, имеют

объекты, удаляющиеся вдоль луча зрения со скоростью $v = c (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$, где c — скорость света. В этом случае смещение линий соответствует лучевой скорости светила. Смещение линий в красную сторону спектра указывает, что галактики удаляются друг от друга. Но долгое время полагали, что явление красного смещения может иметь и другие причины.

В 1929 г. Э. Хаббл, сравнивая красные смещения и расстояния галактик, обнаружил, что красные смещения в среднем пропорциональны расстояниям (рис. 9):

$$c (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = H_0 r.$$

Коэффициент пропорциональности H_0 по последним точным оценкам равен 55 км/сек на Мпс. Закон Хаббла оказался прекрасным средством определения расстояний до тысяч галактик.

Когда нужно определить расстояние до галактики, красное смещение которой не измерено, прибегают к грубым способам оценки расстояния, например, по видимой и абсолютной звездным величинам галактик соответствующих типов, по угловым размерам галактик и крупнейших газовых сгустков в них. Для самых далеких галактик задача определения расстояния осложняется тем, что на ослабление блеска и угловые размеры начинает влиять еще и сам эффект красного смещения.

Каковы же размеры, массы и мощность излучения галактик? Зная расстояния до них, можно ответить и на эти вопросы. Проще других определяется мощность излучения (светимость), которую мы умеем выражать в абсолютных величинах. Размеры же и масса галактики возрастают по мере перехода от абсолютно слабых галактик к более ярким. Возрастанию абсолютной величины на единицу соответствует увеличение диаметра галактики в полтора раза, а массы — в два раза (спиральных) и в три раза (эллиптических).

По абсолютным величинам галактики можно подразделить на классы светимости. Среди эллиптических галактик встречаются как сверхгигантские, так и карликовые. Среди неправильных гигантских нет и т. д. Сведения о представителях галактик основных типов, их средних абсолютных величинах и массах даны в табл. 4.

Зная расстояния до галактик и их положение на небе, можно установить их размещение в пространстве относи-

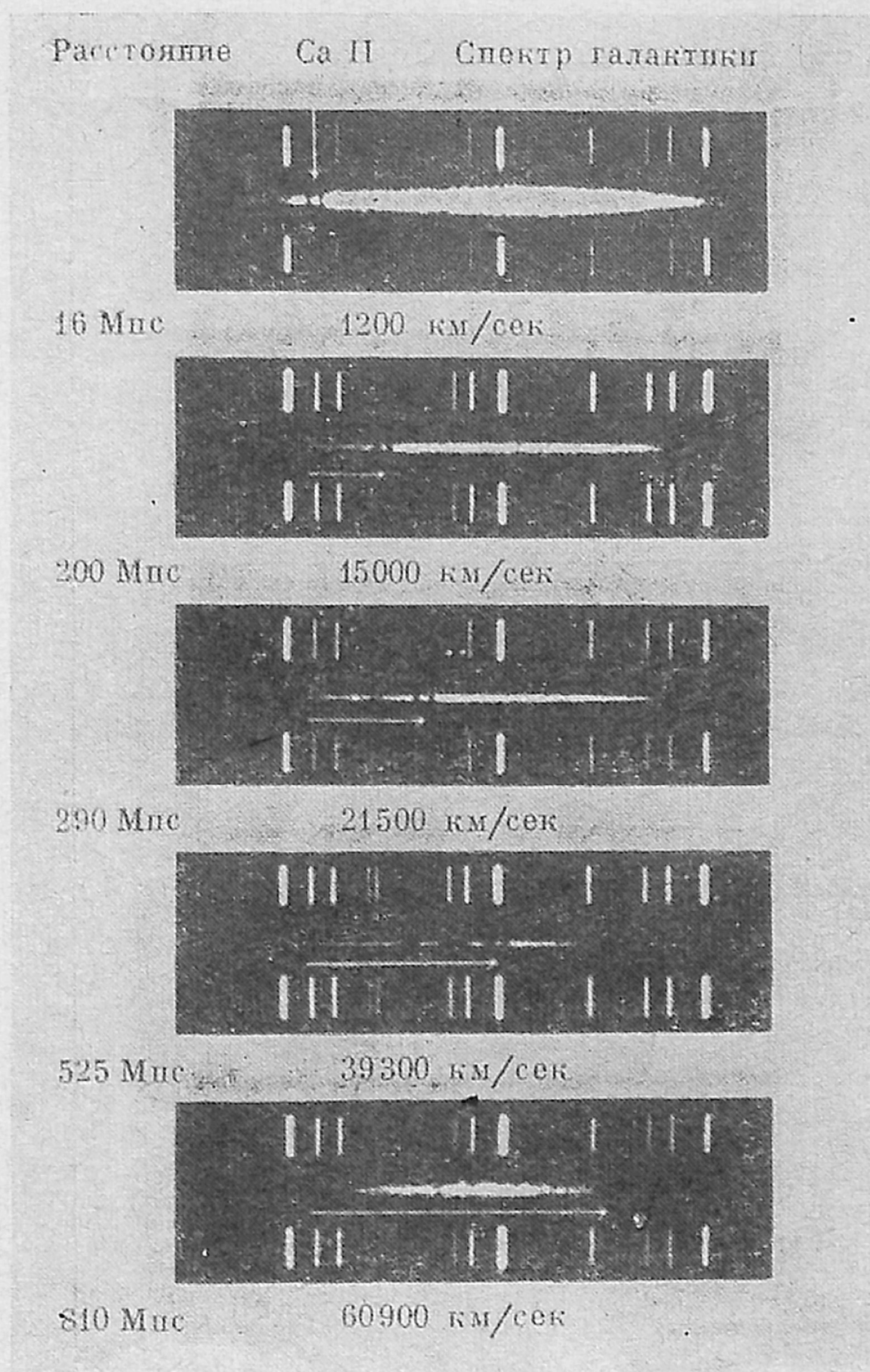


Рис. 9. Закон Хаббла. Величина красного смещения галактики пропорциональна ее удаленности. (Проследите за смещением пары линий поглощения CaII, отмеченном стрелками

Таблица 4

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГАЛАКТИК

Класс светимости	Светимость галактик		Масса, $M_{\odot}$	Тип галактик
	абсолютные величины, m	эрг/сек		
Яркие сверхгиганты	—24	10^{15}	10^{13}	E
Нормальные сверхгиганты	—22	$2 \cdot 10^{14}$	10^{12}	E, S
Яркие гиганты	—20	$3 \cdot 10^{13}$	10^{11}	E, S
Нормальные гиганты	—18	$5 \cdot 10^{12}$	10^{10}	E, S, I
Яркие карлики	—16	$8 \cdot 10^{11}$	10^9	E, S, I
Нормальные карлики	—14	10^{11}	10^8	E, S, I
Слабые карлики	—12	$2 \cdot 10^{10}$	10^7	E
Пигмеи	—8	$5 \cdot 10^8$	10^6	E

тельно нашей звездной системы. Оказалось, что галактики встречаются как одиночные, так и двойные, группами, большими скоплениями и даже «облаками» скоплений (сверхскоплениями).

Средние расстояния между галактиками в группах и скоплениях — сотни килопарсек, а между группами галактик, одиночками и т. д. — в среднем 1—2 Мпс. Скопления удалены друг от друга в среднем на десятки мегапарсек.

Наша Галактика и туманность Андромеды входят в Местную группу галактик. Это два главных объекта группы, каждый из которых имеет по несколько галактик-спутников. Крупнейшие спутники нашей Галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака. Туманность Андромеды имеет четыре больших эллиптических спутника. И все же по полному числу спутников первенство за нашей звездной системой: она имеет целую свиту карликовых туманностей. Кроме того, в состав Местной группы входит несколько самостоятельных членов — галактик небольших размеров: спиральная галактика М 33 в созвездии Треугольника и три неправильных. В табл. 5 приводится «перепись населения» нашей Местной группы по данным на 1974 г. Но, по-видимому, она не исчерпывает списка членов. Возможно, что поглощающая материя нашей Галактики скрывает какой-нибудь близкий член Местной группы.

«ПЕРЕПИСЬ НАСЕЛЕНИЯ» МЕСТНОЙ ГРУППЫ ГАЛАКТИК
НА 1974 год

Семейство	Состав (указано созвездие)	Тип	Расстояние до Земли, кпс	Абсолютная величина, <i>m</i>	Масса, млн. масс Солнца
Нашей Галактики	Наша Галактика	Sb	—	—20	250000
	Большое Магелланово Облако (Тукал)	Im	48	—18	14000
	Малое Магелланово Об- лако (Золотая Рыбка)	Im	58	—17	5000
	Карлик (Печь)	E	188	—12	20
	Карлик (Лев-I)	E	220	—11	4
	Карлик (Лев-II)	E	220	—10	1
	Карлик (Лев-III)	E	250	—10	1
	Карлик (Скульптор)	E	84	—10	3
	Карлик (Малая Медве- дица)	E	67	—10	0,1
	Карлик (Дракон)	E	67	—10	0,1
	Пигмей (Орион)	E	80	—7	?
	Пигмей (Козерог)	E	70	—6	?
Туман- ности Андро- меды	Туманность Андромеды (M 31)	Sb	700	—21	360000
	Яркий карлик (M 32)	E	700	—16	2600
	Яркий карлик (Андро- меда)	E	700	—15	2000
	Карлик (Кассиопея)	E	600	—14	150
	Карлик (Кассиопея)	E	600	—13	100
	I—IV карлики ван ден Берга (Андро- меда) {	E	700	—11	1
		E	700	—11	1
		E	700	—11	1
		E	700	—11	1
Одиночки	Туманность Треугольник	Sc	720	—19	20000
	Карлик (Стрелец)	Im	440	—15	1500
	Карлик (Кит)	Im	690	—14	350

Есть несколько групп галактик, ближайших к Местной группе. Это — группа Южного галактического полюса, группа Центавра-А, группы в Большой Медведице, Льве и Гончих Псах. В наших окрестностях сейчас найдено более 50 малых групп галактик.

Кроме небольших групп найдено много богатых скоплений с сотнями и тысячами галактик. Ближайшее такое скопление находится в созвездии Девы на расстоянии 13,8 Мпс. В его составе семь гигантских эллиптических галактик, в том числе радиогалактика Дева-А и девять

гигантских спиральных. Треть галактик — скопления эллиптические и S0, остальные — спиральные. Размеры этого скопления 14 Мпс, но сейчас скопление в Деве считают лишь центральным сгущением сверхскопления, к которому принадлежат наша Местная группа и ее соседи. Общее число галактик нашего сверхскопления около 10 000, диаметр его около 50 Мпс. Найдено уже полсотни таких сверхскоплений.

У спиральных и неправильных галактик наблюдается радиоизлучение, аналогичное радиоизлучению нашей Галактики. У обычных эллиптических галактик радиоизлучение незначительно и обнаружено лишь недавно с большим трудом. Но среди сверхгигантских эллиптических галактик и реже среди спиральных встречается особый класс галактик с сильным нетепловым радиоизлучением. К таким радиогалактикам относятся близкие к нам Центавр-А, М 82, Печь-А, Дева-А. Самая близкая к нам радиогалактика высокой мощности — Лебедь-А — на фотографиях выглядит как пара слабых эллиптических галактик 16-й величины, зато ее радиоизлучение, например на волне 1 м, уже соответствует объекту 2-й звездной величины, если выражать радиоизлучение в этих единицах. Сейчас известны сотни радиоисточников, оказавшиеся радиогалактиками.

В 1963 г. было обнаружено, что на месте некоторых радиоисточников вместо галактик находятся точечные оптические объекты — квазары. Линии в спектрах этих объектов показывают огромные красные смещения. Если красное смещение в их спектрах имеет обычное доплеровское объяснение (а это, по-видимому, так), то квазары представляют собой внегалактические объекты с массами в десятки тысяч солнц.

Вся совокупность галактик, квазаров и объектов межгалактической среды, частью которой является наблюдаемое множество внегалактических объектов, составляют так называемую Метагалактику. Красное смещение галактик отражает одно из важнейших свойств Метагалактики: ее расширение. Других объяснений этому явлению не найдено. Более того, обнаружено метагалактическое тепловое радиоизлучение — остаточное излучение того первоначального газового облака, из которого формировались галактики около 13 млрд. лет назад, когда они находились ближе друг к другу и представляли собой сгустки этого

облака. А еще ранее вещество Метагалактики находилось, по-видимому, в сверхплотном состоянии; после взрыва этого вещества началось расширение и эволюция Метагалактики и ее членов.

Основная часть наблюдаемого вещества Метагалактики сейчас сосредоточена в звездах, только несколько процентов сохраняется в виде межзвездного газа и пыли, а также межгалактического газа. Некоторая часть материи Метагалактики находится в форме излучения. В раннюю эпоху существования Метагалактики, когда она имела высокую температуру, световая форма материи даже преобладала.

Так выглядит по современным взглядам Вселенная, и так мы представляем ее историю и ее будущее развитие. Опираясь на эти сведения, мы можем теперь подробнее познакомиться с основным предметом нашей книги — с новыми и сверхновыми звездами.

ОБЫКНОВЕННЫЕ НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

Как открывают новые

Мы уже знаем, что появление новой звезды не представляет собой рождения звезды в месте, где ее до сих пор не было. Когда в астрономическую обсерваторию приходит телеграмма об открытии новой, астрономы приступают к ее наблюдению: фотографируют ту часть неба, где обнаружена вспышка, а также получают спектры новой звезды. Кроме того, астрономы просматривают многочисленные старые снимки этой области неба, чтобы узнать, какой величины была эта звезда до вспышки. И часто поиски оказываются удачными: на месте вспышки действительно ранее была видна слабая звездочка, не изменявшая сильно своего блеска. Особая же удача бывает, когда эту часть неба фотографировали накануне открытия новой. В этих случаях удастся обнаружить и оценить звездную величину новой в период подъема ее блеска. Казалось бы, скромный успех? Но астрономы, увы, пока еще не обнаружили признаки, по которым можно предвидеть, что звезда готовится к вспышке. Не удалось пока застать и самое начало вспышки.

Чаще всего новую звезду обнаруживают, когда она уже стала медленно гаснуть, и значительно реже — до того момента, как она достигла наибольшего блеска (максимума).

В отличие от других разновидностей взрывных звезд, с которыми мы будем знакомиться позже, типичные новые звезды — это такие, у которых наблюдалась единственная вспышка, в ходе которой блеск быстро увеличивался на 5—17 звездных величин, т. е. в тысячи и даже миллионы раз, а затем новая начинала сравнительно медленно ослабевать и постепенно возвращаться к своему первоначальному слабому блеску.

Хотя вспышки новых звезд наблюдали еще тысячелетия назад, систематически обнаруживать их стали лишь в последнее столетие. С тех пор найдено около двухсот новых звезд. Теперь ежегодно их открывается до десятка. Но в нашем столетии среди них была всего одна, превосходившая в момент максимума блеска нулевую звездную величину.

Самая яркая новая в нашем веке вспыхивала в созвездии Орла в 1918 г. Ее поэтому называют Новая Орла 1918 г. Немного слабее ее были Новая Персея 1901 г. и Новая Кормы 1942 г.

Следует отметить, что примерно с 1604 г., когда была обнаружена очень яркая Новая Змееносца (или Новая Кеплера, в действительности оказавшаяся сверхновой звездой), астрономы вплоть до начала нашего века не открывали ярких новых звезд. Это объясняется, главным образом, неблагоприятными сезонными условиями. Разве не могло быть вспышек звезд в созвездиях, которые в это время года не видны, так как восходят и заходят днем? Например, созвездия, видимые низко над горизонтом в южной стороне неба зимой, нельзя видеть в течение летнего сезона и наоборот. Или, например, случится две недели непогоды в Европе, где в прошлом веке были сосредоточены почти все обсерватории, и новая звезда ослабевала так, что ее уже не найти простым глазом. Несомненно, что некоторые яркие вспышки новых теряются и в наше время.

Медленные и быстрые новые звезды

Мы уже говорили, что важной характеристикой звезд, изменяющих блеск, являются их кривые блеска (рис. 10). У новых звезд кривые блеска делятся на два главных участка: участок подъема до максимума и участок падения блеска после максимума. Сравнение кривых блеска различных новых звезд показало, что подъем блеска в среднем всегда идет быстрее падения и, чем быстрее подъем, тем больше и скорость последующего «погасания» звезды. Каждый участок кривой блеска новой звезды кроме того имеет свои особенности.

Кривая возрастания блеска обычно не совсем гладкая: примерно за две величины до максимума блеск новой несколько часов почти не меняется или возрастает

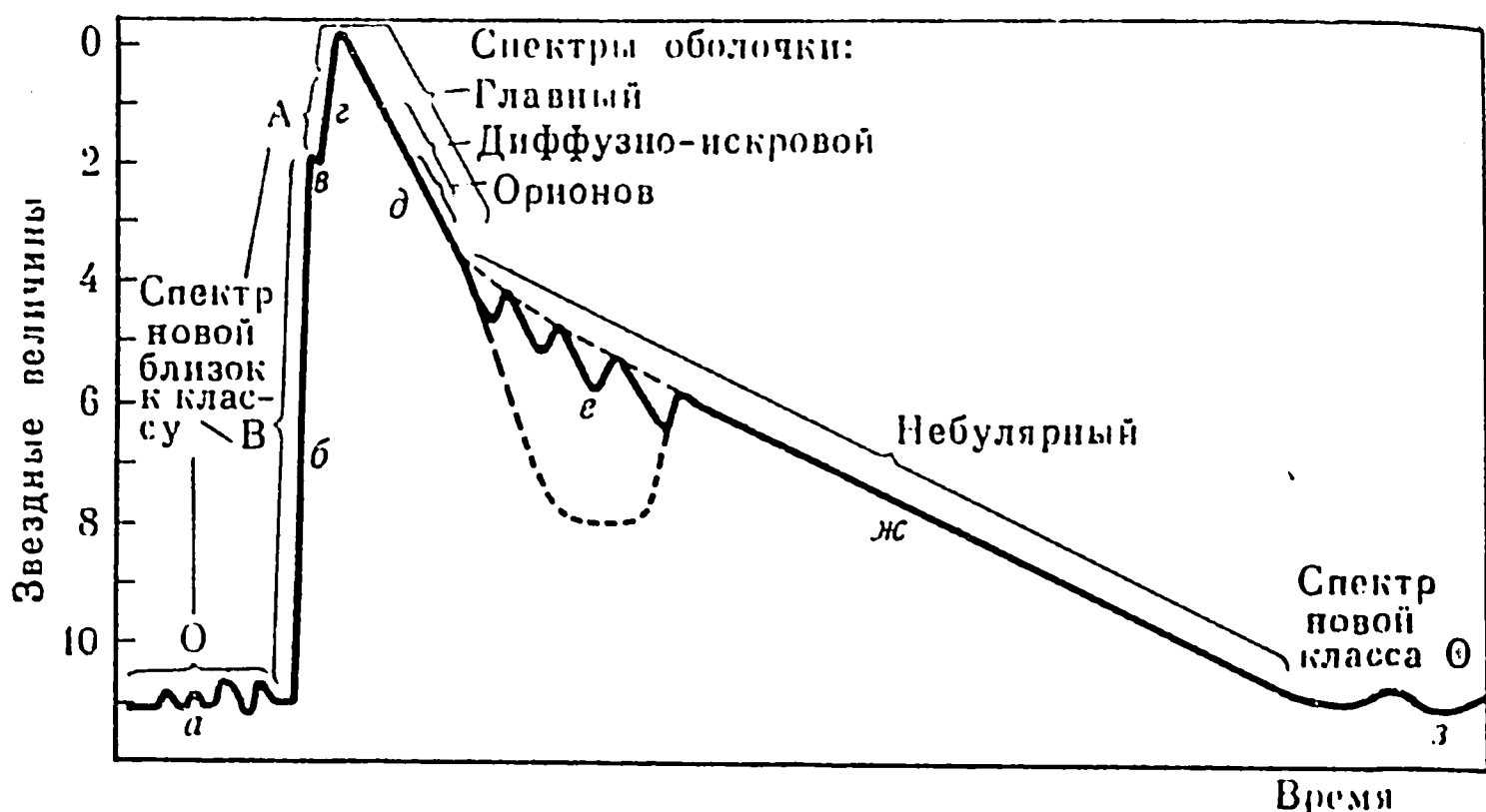


Рис. 10. Схема кривой блеска новой звезды с указанием стадий, наблюдаемых в ее спектре

а — состояние до вспышки, б — начальный подъем, в — предмаксимальная задержка, г — конечный подъем, д — первоначальный спад, е — переходный период, ж — конечный спад, з — состояние после вспышки. Показаны три типа поведения новой звезды во время переходного периода

медленнее. После этого звезда увеличивает блеск до максимального и вскоре после этого начинает ослабевать. После первоначального периода ослабления блеска на 3—4 звездных величины новая звезда вступает в так называемый переходный период. В это время новые звезды ведут себя по-разному. У одних убывание идет и далее плавно, у других — носит колебательный характер, а у третьих — блеск резко падает на несколько звездных величин, но спустя некоторое время частично восстанавливается. С этого времени начинается период окончательного спада блеска до звездной величины, какую новая звезда имела до вспышки.

Новые звезды очень разнообразны не только по характеру изменения блеска, но и по скорости его изменения. Вот, например, кривая блеска очень быстрой Новой Персея 1901 г. (рис. 11, а). До вспышки эта звезда была, по-видимому, 13-й звездной величины. Найдена она была уже во время возрастания блеска как звездочка 11-й величины и за 27 часов увеличила блеск до 3-й величины. Затем, не сделав остановки, она несколько сбавила скорость нарастания блеска и еще спустя 38 часов достигла максимума блеска. Следовательно, на то, чтобы увеличить свой

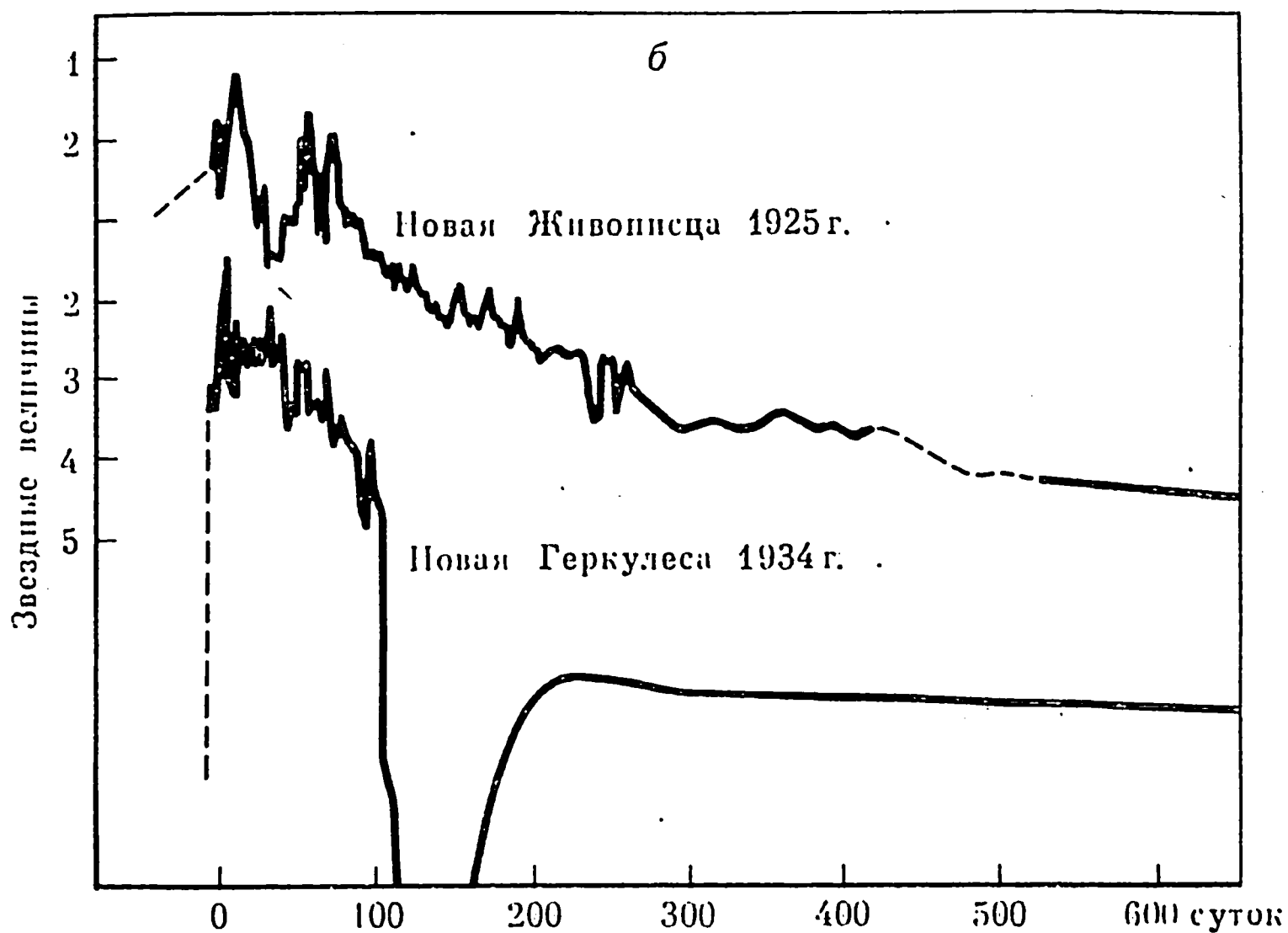
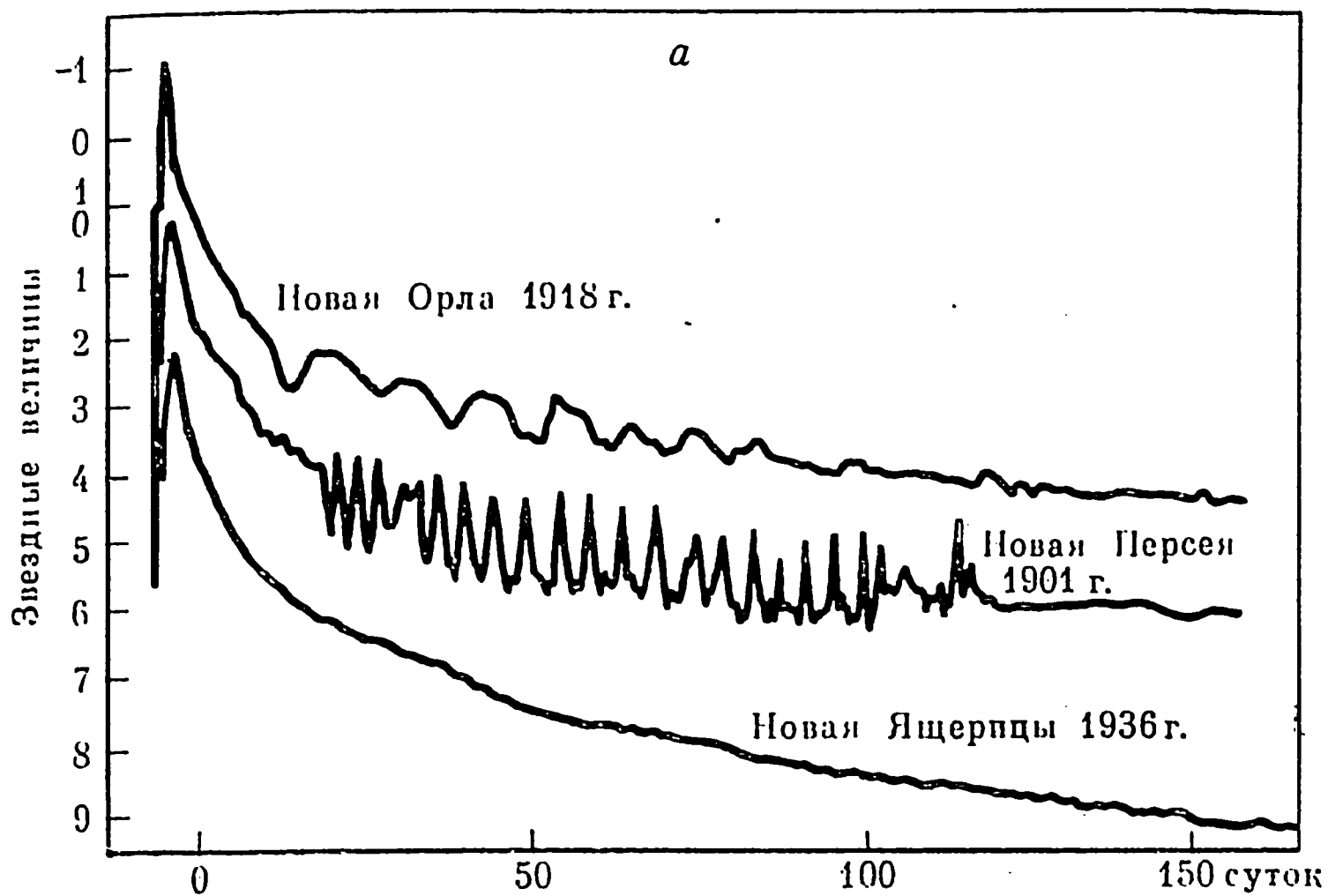


Рис. 11. Кривые блеска быстрых (а) и медленных (б) новых звезд

блеск, ей понадобилось всего трое суток. В максимуме она пробыла лишь несколько часов, и после быстрого (двухнедельного) первоначального ослабления блеск этой новой звезды стал колебаться и ослабление до минимума растянулось на 15 лет. Сейчас блеск ее колеблется между 12-й и 14-й звездными величинами.

Другой пример, на этот раз медленной новой, представляет также яркая Новая Геркулеса 1934 г. (рис. 11, б). Она была открыта как звезда 3-й величины за 9 суток до максимума блеска. Но несомненно, что до этого ее блеск возрастал быстро, так как за 30 суток до открытия на снимках она была еще, как и всегда, звездой 15-й величины. В максимуме блеска новая звезда была вдвое суток.

Последовавшее затем ослабление блеска с самого начала носило колеблющийся, периодический характер: звезда то слабела на полторы величины, то вдруг увеличивала свой блеск почти до максимума — и так трижды. Наконец, на 110-е сутки после максимума она резко уронила блеск сразу на 7 звездных величин и оставалась слабой 100 суток, после чего снова вскарабкалась на плавное продолжение своей кривой блеска (как будто бы никуда и не проваливалась) и медленно ослабевает уже несколько десятилетий, приближаясь к 15-й величине.

Поистине, сколько новых звезд, столько и различных кривых блеска, но, как мы сейчас увидим, новые звезды можно подразделить на несколько классов по скорости и характеру изменения их блеска. В табл. 6 приводится описание нескольких типичных кривых блеска новых. Как видно из нее, по длительности падения блеска после максимума на три звездных величины их можно подразделить на четыре класса: очень быстрые (падение менее чем за полмесяца), быстрые (от половины месяца до двух), медленные (более двух месяцев) и очень медленные (десятилетия).

Здесь следует сказать подробнее об очень медленных новых звездах. До обнаружения в 1909 г. Новой Змеи, относящейся к этому классу, на ее месте не наблюдалось звезды ярче 15-й величины. В течение пятнадцати лет — до 1923 г. — она колебалась между 10-й и 11-й величинами, а затем стала постепенно слабеть. За следующие пятнадцать лет ее блеск понизился на три величины. Есть и еще более удивительные очень медленные новые.

ХАРАКТЕР КРИВЫХ БЛЕСКА НЕКОТОРЫХ НОВЫХ ЗВЕЗД

Новая, год вспышки	Звездные величины, <i>m</i>		Характер кривой блеска		Продол- житель- ность падения	
	в макси- муме	в мини- муме	первоначальный спад	переходный период	на 3 ве- личины, сутки	до мини- мума, годы

Очень быстрые

Орла 1918	—1	12	Гладкий	Колеблющийся	8	7
Орла 1936	5	18	Колеблющийся	Гладкий	16	—
Лебедя 1920	2	17	Гладкий	С минимумом	16	8
Близнецов 1903	5	16	»	С горбом	17	—
Ящерицы 1936	2	15	»	Гладкий	10	9
Персея 1901	0	13	»	Колеблющийся	13	15
Кормы 1942	0	17	»	Гладкий	7	—

Быстрые

Орла 1945	7	18	Гладкий	Колеблющийся	31	—
Близнецов 1912	3	15	Колеблющийся	То же	37	—
Ящерицы 1910	5	15	Гладкий	Гладкий	37	—
Ящерицы 1950	5	16	Колеблющийся	Колеблющийся	29	4
Стрельца 1898	5	16	Гладкий	С минимумом	20	9
Щита 1949	7	17	Колеблющийся	Гладкий	40	—

Медленные

Возничего 1891	4	16	Колеблющийся	С минимумом	80	15
Лебедя 1948	8	18	»	Колеблющийся	160	—
Геркулеса 1934	1	15	»	С минимумом	100	20
Змееносца 1848	4	13	»	Гладкий	145	30
Живописца 1925	1	12	»	С минимумом	150	25

Очень медленные

Змеи 1909	9	17	Колеблющийся	—		19
Телескопа 1949	7	11	»	—		15
Киля 1843	—1	8	»	—		17

Большое разнообразие в скорости развития процессов в новых звездах, несомненно, связано с различиями в мощности взрывов, составляющих причину явления. Чтобы оценить мощность и энергию, выделяемую новыми звездами при вспышках, нужно уметь определять расстояния до них и их абсолютные величины.

Пути определения расстояний и абсолютных величин новых

Мы уже знаем, как находят расстояния до звезд. Но в случае новых звезд обычные способы использовать удастся редко. Например, спектральные методы определения абсолютных величин здесь непригодны, так как спектры новых звезд, как мы увидим далее, необычны.

Пришлось изыскивать другие способы. Самый надежный из них основан на том, что при вспышке новой звезды образуется расширяющаяся оболочка, которую можно наблюдать сначала спектрально, а затем и на снимках.

Возьмем для примера одну из наблюдавшихся в нашем веке вспышку Новой Персея 1901 г. Изучение ее спектра в эпоху максимального блеска показало, что вокруг звезды образовалась оболочка, расширяющаяся со скоростью около 1200 км/сек. Скорость расширения оболочки была найдена по принципу Доплера из смещения линий поглощения в спектре новой звезды. Через несколько лет после вспышки на фотографиях вокруг звезды была обнаружена слабая туманность, радиус которой систематически увеличивался примерно на 0,54 угловую секунду за год. Это была сама расширяющаяся оболочка (рис. 12). Если учесть, что в году около 31,6 млн. секунд, то по скорости расширения, найденной ранее по спектру оболочки, мы можем подсчитать годовой прирост оболочки в километрах или в астрономических единицах: $1200 \times 31,6 \text{ млн.} = 37,9 \text{ млрд. км} = 254 \text{ а. е.}$ Вспомним теперь, что парсеком мы называем расстояние, с которого астрономическая единица видна под углом в 1 секунду. Следовательно, расстояние до Новой Персея будет в соответствующее число раз больше, т. е. равно 470 пс.

В редких случаях удастся спустя полгода после вспышки обнаружить быстро расширяющееся кольцо — это новая звезда временно освещает случайно оказавшуюся рядом с ней пылевую туманность. Мы наблюдаем таким образом распространение световой волны в пылевой туманности или, другими словами, световое эхо вспышки. И в этом случае тоже можно рассчитать расстояние до новой звездой, аналогичным применяемому к расширяющейся оболочке новой звезды.

Пока расширяющиеся оболочки наблюдали в пятнадцати, а световое эхо — в четырех случаях. Расстояния до

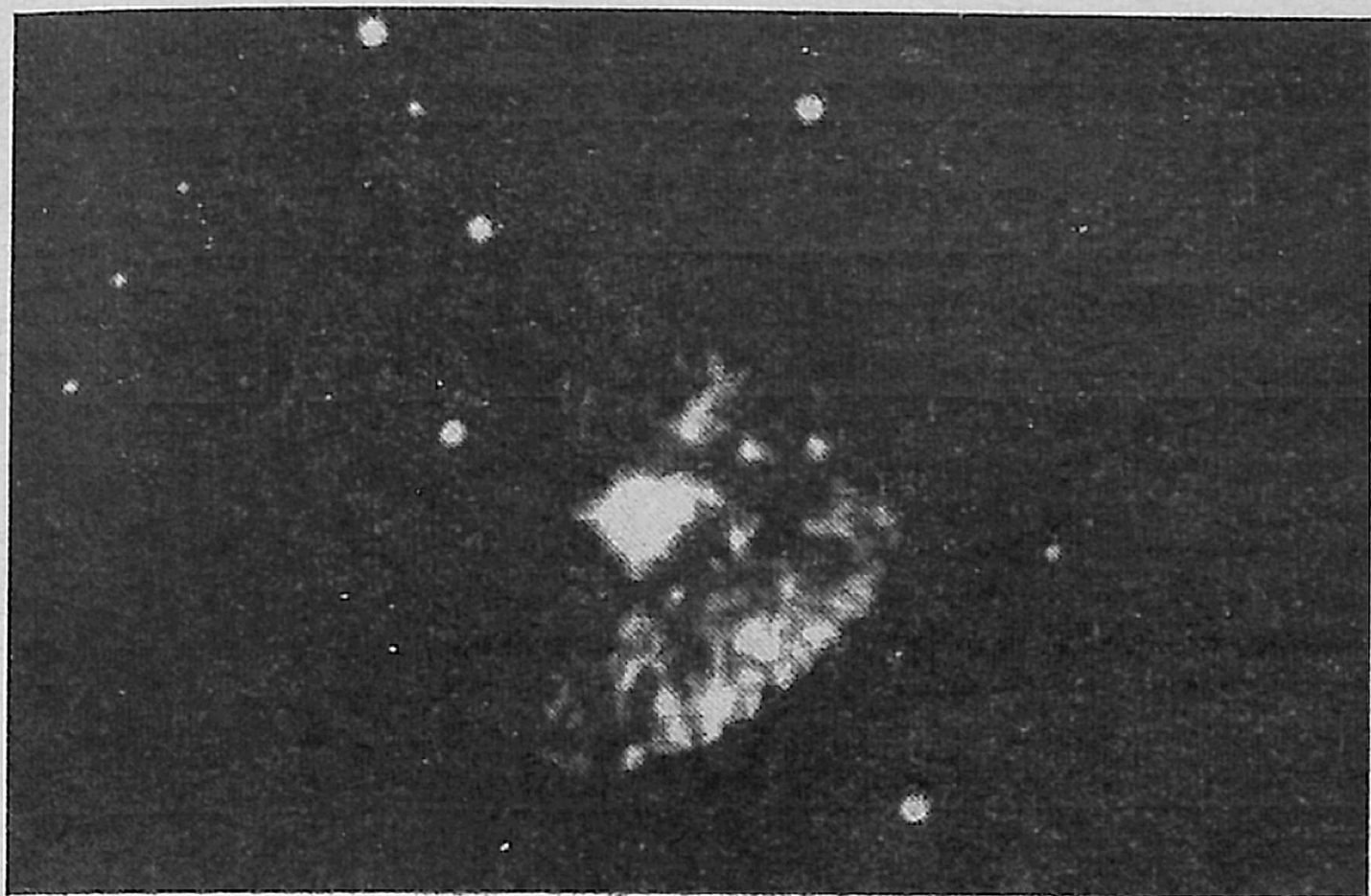


Рис. 12. Фотография Новой Персея 1901 г. и ее оболочки, полученная на 5-метровом телескопе через 60 лет после вспышки

остальных новых, у которых известны видимые величины в максимуме блеска, находят по известной уже нам формуле, связывающей расстояние и видимую и абсолютную величины светила. Изучение абсолютных величин новых звезд в максимуме блеска имеет поэтому особое значение.

Сначала удалось разными способами установить средние абсолютные величины новых в максимуме блеска. Для этой цели использовались и абсолютные величины отдельных новых звезд, найденные по хорошо известным расстояниям до них, и статистические методы. Последние основаны на том, что расстояние входит во многие формулы, описывающие средние движения и положения звезд в Галактике. Вычислять расстояния до отдельных звезд с помощью таких формул, верных лишь для групп одинаковых по свойствам звезд, трудно, но зато средние расстояния эти формулы дают неплохие. После изучения абсолютных величин новых звезд туманности Андромеды этим методам теперь оставлена роль ориентировочных (контрольных) оценок.

Как видно из табл. 7, где приведены абсолютные величины 8 новых звезд, расстояния до которых удалось найти по расширяющимся оболочкам, их абсолютные величины

Таблица 7

АБСОЛЮТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ НОВЫХ ЗВЕЗД В МАКСИМУМЕ БЛЕСКА

Новая, год вспышки	Скорость расширения		Расстояние, пс	Видимая величина, m		Абсолютная величина в максимуме, m
	угловые секунды за год	км/сек		в максимуме	в минимуме	
Орла 1918	0,956	1700	376	—1	12	—9
Возничего 1891	0,117	1760	830	4	16	—6
Лебедя 1920	0,093	700	1590	2	17	—10
Геркулеса 1934	0,270	290	230	1	15	—6
Ящерицы 1936	0,250	1600	1340	2	15	—9
Персея 1901	0,540	1200	470	0	13	—8
Живописца 1925	0,180	410	480	1	12	—7
Кормы 1942	0,210	700	700	0	17	—9

в максимуме колеблются от $-9,6$ до $-6,5$. Следовательно, когда вместо них используем среднюю абсолютную величину (она равна $-8,1$), то получим грубые оценки расстояний, иногда завышенные или заниженные более чем в два раза.

К счастью, американским исследователем Д. Мак-Лофлином еще в 1945 г. по этим нескольким новым было обнаружено, что абсолютные величины быстрых новых обычно больше, чем медленных. Таким образом, по скорости ослабления блеска мы можем найти абсолютную величину новой в максимуме и вычислить ее расстояние точнее, чем просто по средней абсолютной величине. Но пока эта закономерность была основана на нескольких оценках, преимущества ее использования были невелики. Она скорее была угадана, чем установлена. Лишь десятилетие спустя аккуратное исследование блеска новых звезд в туманности Андромеды подтвердило и уточнило найденную Мак-Лофлином закономерность.

Перепад между блеском в максимуме и в минимуме называется амплитудой колебания блеска новой. Как мы уже знаем, он составляет от 5 до 17 звездных величин. У быстрых новых амплитуды обычно оказываются больше, чем у медленных. Таким образом, основные различия между новыми звездами заключены в мощности вспышек — в их максимальных светимостях и скоростях возгорания и ослабления. А абсолютные величины новых звезд в минимуме блеска (т. е. стадии, в которой новая

пребывает основное время жизни) сходны: от 3^м до 5^м за редкими исключениями.

Итак, в стадии минимального блеска новые звезды оказываются объектами малой светимости, подобно нашему Солнцу. Однако, как мы узнаем, познакомившись с физической природой новых звезд, они существенно отличаются от нашего светила во многих отношениях.

Новые в туманности Андромеды

Еще в 1929 г. Хаббл нашел в близкой к нам спиральной системе — в туманности Андромеды — несколько десятков новых звезд. С тех пор исследователи часто находят новые в этой галактике. Сейчас их число приближается к двумстам. Особенно ценным было исследование американского астронома Х. Арпа. Он изучил множество фотографий этой туманности, полученных в 1953—1955 гг. в течение 290 ясных ночей, и нашел 30 новых звезд, блеск которых аккуратно измерил.

Звезды в туманности Андромеды практически все находятся на одинаковом расстоянии от нас, теперь хорошо установленном и равном 690 кпс. Поэтому для вспыхивающих в ней новых звезд абсолютные величины в максимумах блеска находятся без особых трудностей, если только вспышка не произошла в области с большим поглощением света.

Одинаковы ли по свойствам новые этой туманности с новыми нашей Галактики? Этот вопрос исследован, и найдено, что физически они одинаковы. Следовательно, закономерность между абсолютной величиной в максимуме и скоростью падения блеска новой может служить для определения расстояний до новых звезд в нашей Галактике.

Но не только этому помогло исследование новых звезд в соседней с ними галактике. Наблюдения за появлением новых в туманности Андромеды велись регулярно на протяжении нескольких лет, что позволило оценить, сколько в среднем новых вспыхивает в этой галактике за год. Получились оценки 26—31 в год (последняя оценка принадлежит советскому астроному А. С. Шарову). В нашей Галактике среднее число вспышек новых в год оценить трудно, так как из-за сильного поглощения света в Млечном Пути мы хорошо видим вспышки только ближайших

к нам новых и не замечаем более далекие, а те новые, которые вспыхивают вблизи ядра Галактики и за ним, вообще не могут быть обнаружены из-за сильного поглощения света. Приходится делать подсчеты в небольшой области Галактики — в радиусе 2 кпс вокруг Солнца и затем увеличивать оценок в 80—100 раз. Исследователи получают оценки, превышающие частоту вспышек новых в туманности Андромеды. Так, А. С. Шаров получил 260 новых в год в нашей Галактике. Почти десятикратное расхождение с туманностью Андромеды требует дальнейшего исследования этого вопроса.

Для всех когда-либо обнаруженных новых в туманности Андромеды сохранились сведения о месте их вспышек, и по ним можно судить о размещении новых звезд в этой галактике.

Много вспышек отмечалось в области центра системы и меньше на периферии. Это указывает на то, что новые звезды не являются объектами плоской подсистемы, а относятся к промежуточной или сферической. К какой же из них? В этом помогает разобраться то, что главная плоскость туманности Андромеды видна под большим наклоном к лучу зрения. В таком случае плоская подсистема (спиральные рукава) и промежуточная подсистема вследствие перспективы выглядят сжатыми эллипсами, тогда как сферическая подсистема (шаровые скопления, окружающие туманность) таких перспективных искажений почти не терпит. Новые звезды показывают перспективно сжатое распределение и выявляют себя как промежуточное население звездной системы.

Эти выводы подтверждают и исследования размещения новых в нашей Галактике. По новым, находящимся сравнительно близко к нашему Солнцу, к сожалению, нельзя составить полное представление о их распределении в Галактике, как это удается для туманности Андромеды, наблюдаемой извне. Но и по обнаруженным в нашей Галактике новым видны их большая концентрация к центральной области Галактики и умеренная концентрация вспышек к главной плоскости Галактики. Эта умеренная концентрация характерна для объектов промежуточной подсистемы. По средней высоте новых звезд над галактической плоскостью их относят к населению диска Галактики.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЛЕТОПИСИ
НОВЫХ ЗВЕЗДТри оптически важных слоя в оболочке
новой звезды

Мы уже знаем, что спектральный анализ дает богатые сведения о физических условиях в оболочках звезд. Особенно плодотворно изучение спектров новых звезд. Каждая деталь их несет кроме обычных сведений еще и дополнительную информацию о событиях, происходящих в слоях, где эта спектральная деталь образуется. А весь спектр в целом дает для каждого момента многопанорамную картину явления, важнейшие детали которой астрофизики теперь умеют понимать.

В серии спектров новой звезды, сфотографированных на последовательных стадиях изменения ее блеска, перед исследователем, как в настоящем кинофильме, проходит развитие явления новой звезды от образования плотной расширяющейся оболочки после вспышки и до превращения ее в разреженную газовую туманность. Изучение спектров новых звезд дает также сведения о размерах и плотности оболочек на разных стадиях, их массах, тепловых режимах и химическом составе.

Важной особенностью спектров новых звезд является смещение в фиолетовую сторону линий поглощения. Согласно принципу Доплера, это означает, что газ, в котором они образуются, т. е. обращенная к нам часть оболочки, движется в нашу сторону. Следовательно, в целом газовая оболочка новой звезды расширяется. Как мы уже говорили, спустя некоторое время после вспышки новой это подтверждается прямыми наблюдениями расширяющейся туманности вокруг угасающей новой звезды.

Как и в обычных звездах, оболочка новой имеет фотосферу, непрозрачную для оптического излучения, которая создает непрерывный спектр оболочки, и обращающий слой, непрозрачный для излучения фотосферы только

в спектральных линиях газов, образующих оболочку. Но кроме линий поглощения в спектре новой звезды вскоре после максимума блеска становятся заметны и яркие линии излучения. Такие линии обычно оттеняются с фиолетовой стороны темной линией поглощения, присутствовавшей в спектре новой еще до появления яркой линии. И та и другая линии образуются атомами одного и того же химического элемента, но яркие линии возникают в так называемой протяженной оболочке — разреженном и прозрачном для выходящего из фотосферы излучения слое. Этот слой называется протяженным потому, что его толщина может превосходить радиус фотосферы новой звезды.

Итак, в спектре новой звезды на некоторых стадиях мы встречаемся со спектральными деталями трех сортов, которым соответствуют разные части оболочки (рис. 13): фотосфера, обращающий слой и разреженная протяженная оболочка.

Следует заметить, что в отличие от линий поглощения яркие линии, соседствующие с ними, не смещены в фиолетовую сторону спектра. Это объясняется тем, что протяженная оболочка, в которой возникают яркие линии, прозрачна. Ее полусфера, обращенная к нам, создает фиолетовую сторону яркой линии, а обратная полусфера — красную сторону. С фиолетовой стороны яркая линия резко переходит в узкую линию поглощения.

При расширении звезды протяженная оболочка все более увеличивается по размерам, тогда как размеры фотосферы и обращающего слоя, связанные с непрозрачными плотными областями оболочки, не увеличиваются после достижения звездой максимума блеска. Поэтому после максимума блеска линии излучения в спектре новой звезды продолжают все более усиливаться, а с линиями поглощения происходят необычные превращения: они распадаются на отдельные компоненты, в разной степени смещенные в фиолетовую часть спектра. В ходе расширения оболочки звезды наименее смещенные компоненты этих линий, возникшие в свое время первыми, первыми и исчезают, а самые смещенные временно усиливаются.

В самых разреженных частях оболочки новой звезды образуются особые яркие линии. В этих частях практически нет поглощения, и поэтому они не имеют темных компонент с фиолетовой стороны. Это появляются запрещенные линии, о которых мы уже упоминали в главе II.

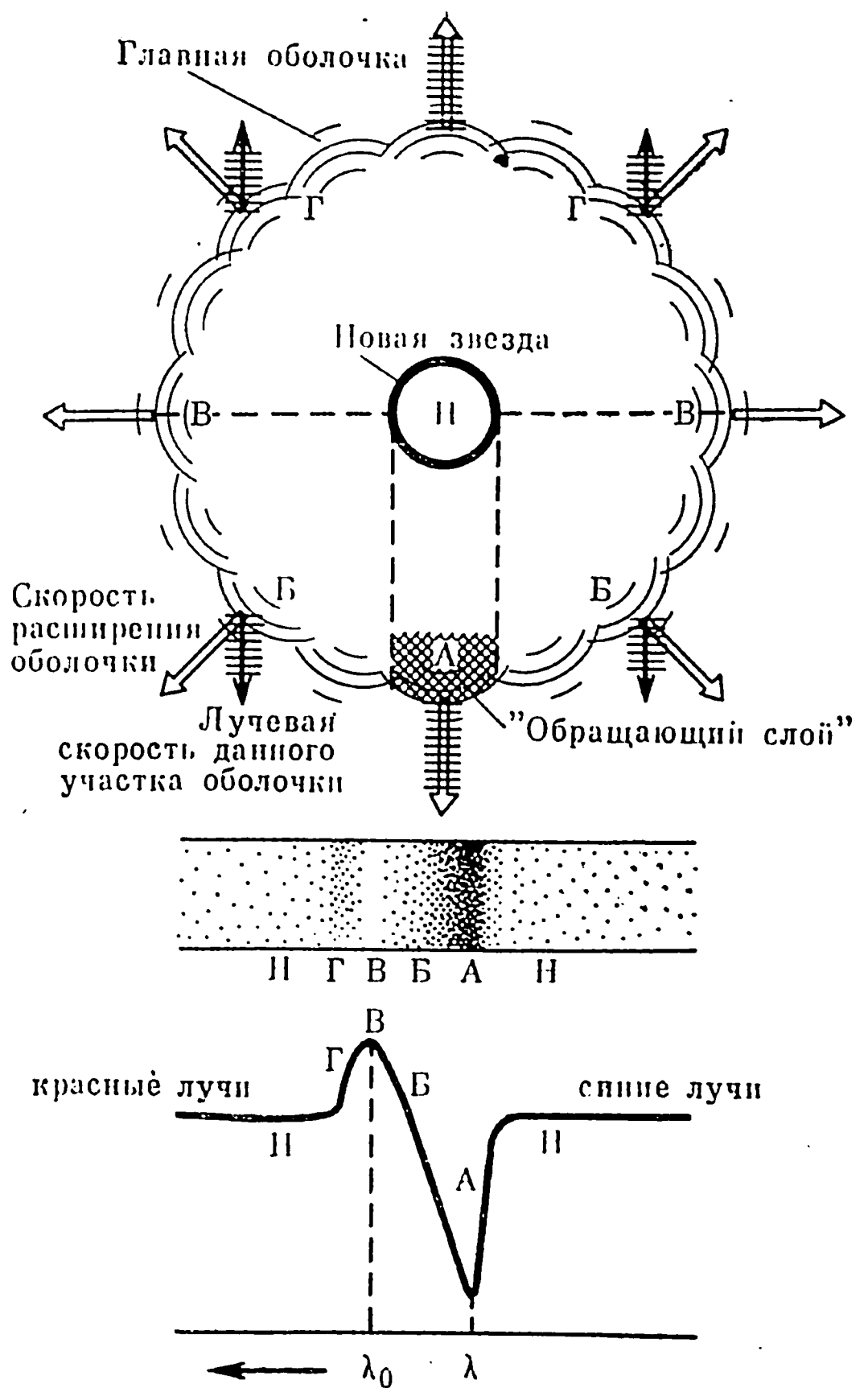


Рис. 13. Образование линий излучения и поглощения в спектре новой звезды

В верхней части рисунка изображена новая звезда с расширяющейся главной оболочкой, в нижней — вид спектральной линии на фотографии спектра новой звезды и схема изменения величины почернения в районе спектральной линии. Новая звезда и ее оболочка образуют разные участки спектральной линии. Эти части и участки обозначены на обеих схемах одними и теми же буквами. Важную роль в этом разъединении играет то, что оболочка очень протяженна и имеет значительную скорость расширения (ее направление и величина схематически отмечены стрелками), а проекции ее на луч зрения (т. е. лучевые скорости участков оболочки, отмеченные пересеченными стрелками) изменяются от положения участка относительно наблюдателя. Сама новая звезда образует непрерывный спектр (Н). Она просвечивает через полупрозрачную часть оболочки (А), которая образует линию поглощения в непрерывном спектре. Области протяженной оболочки Б, В и Г образуют крылья и вершину линии излучения

Они излучаются газами только в условиях крайне низкой плотности под воздействием горячего ультрафиолетового излучения новой.

Первыми в спектрах новых звезд появляются запрещенные линии нейтрального кислорода, хорошо теперь известные геофизикам по исследованиям ночного свечения нашей земной атмосферы и называемые авроральными. Несколько позже появляются запрещенные линии дважды ионизованного кислорода, которые типичны для спектров горячих газовых туманностей и носят в астрономии название небулярных (от латинского «небула» — «туманность»). В спектрах некоторых новых звезд встречаются также запрещенные линии высокоионизованных атомов, характерные для спектра солнечной короны («корональные»).

Раньше, когда о способности известных газов излучать особые запрещенные линии в условиях низкой плотности не знали, линии в спектрах газовых туманностей, не отождествлявшиеся с линиями спектров обычных газов, наблюдаемых в лабораторных условиях, называли линиями «небулия», а аналогичные линии в спектре солнечной короны — линиями «корония». Развитие спектральных исследований позволило разгадать природу линий небулия и корония. Как мы теперь знаем, их излучали известные газы в необычных условиях.

Теперь мы получили представление о сложности спектров новых. Несмотря на значительный успех теории новых звезд, пока изучены и объяснены лишь главные черты этого явления. Но достигнутые успехи свидетельствуют, что астрономы идут по верному пути.

Основные стадии изменения спектра новой звезды

Познакомимся теперь с последовательностью изменений вида спектров новой звезды и соответствующей ей последовательностью изменений блеска. Разобраться в них удалось еще до объяснения процессов, стоящих за этими изменениями.

Если не считать особых спектров до вспышки и после ее окончания, то новая звезда имеет пять основных спектральных стадий. Вот их названия: предмаксимальный спектр, «главный спектр», диффузно-искровой спектр, орионов спектр, небулярный спектр. Каждая из спектраль-

ных стадий начинается еще до завершения развития предшествующих и сначала существует одновременно с ней.

На рис. 10 была изображена схема кривой блеска новой звезды с размещением на ней основных стадий развития спектра и блеска. Мы видели, что каждой спектральной стадии соответствует свой участок кривой блеска. Схема помогает разобраться в очередности смен спектральных стадий. Достаточно сказать, что специалисты по виду спектра могут разобраться в характере кривой блеска новой звезды и установить, когда она имела максимум, если его не удалось наблюдать из-за позднего открытия звезды.

Проследим теперь основные черты каждой из спектральных стадий.

Предмаксимальный спектр, снятый за 1—2 суток до максимума, показывает сходство со спектрами сверхгигантов типа А—F: это спектры со множеством линий поглощения. Предмаксимальный спектр сохраняется первые дни после максимума. С его исчезновением прекращается сходство спектров новых звезд с обычными звездными спектрами.

Сразу же после максимума блеска спектр новой резко преобразуется. Рядом с линиями поглощения исчезающего предмаксимального спектра с фиолетовой стороны появляются темные «дублиеры», а с красной стороны — яркие линии излучения. Это возник «главный спектр». Среди ярких линий сильнейшие — линии водорода и некоторых металлов, а позже, в ходе развития спектра, появляются также запрещенные линии ряда элементов.

Появление запрещенных линий в спектре происходит очень эффектно. Например, авроральные линии нейтрального кислорода появляются вскоре после максимума блеска и сначала равномерно усиливаются, но потом вдруг ярко вспыхивают. В действительности же в этот момент звезда вступила в стадию быстрого падения блеска, что спектрально соответствует ослаблению ее непрерывного спектра, и на фоне его быстрого ослабления усиление запрещенных линий выглядит «вспышкой».

«Главный спектр» пребывает в непрерывном изменении: одни линии исчезают, другие появляются, некоторые линии поглощения перед исчезновением раздваиваются и т. д. Общая тенденция заключается в том, что усилива-

ются линии, характерные для горячей газовой оболочки, становящейся все более разреженной. Постепенно линии поглощения «главного спектра» слабеют и эта стадия заканчивается. Яркие же линии некоторых атомов еще продолжают свое существование независимо после окончания стадии.

Но еще до значительного ослабления «главного спектра» появляется третья система линий поглощения, смещенная в фиолетовую сторону больше, чем система линий «главного спектра». Новые линии отличаются большой шириной, размытостью (диффузностью) и по составу напоминают спектр мощной электрической искры. За эти особенности астрономы дали ей название диффузно-искрового спектра.

Четвертая система линий поглощения — орионов спектр — появляется также в момент полного развития уже диффузно-искрового спектра. В орионовом спектре преобладают линии, характерные для звезд спектрального типа В, которых много среди звезд созвездия Ориона. Отсюда и родилось в свое время название звезд этого спектрального типа — «орионовы звезды», давшее затем название и стадии спектра новой звезды.

В орионовом спектре новой самыми заметными яркими деталями являются широкие линии дважды ионизованного азота.

Пятая стадия спектра новой звезды — небулярная. Она начинается рано, с появлением первых запрещенных линий, и достигает полного развития, когда исчезают последние линии поглощения. К этому времени спектр новой очень похож на спектры горячих газовых туманностей и состоит из ярких линий водорода, гелия и ряда запрещенных линий.

Когда туманность вокруг новой звезды рассеется, тип спектра самой новой оказывается близким к спектру звезд типа О: сначала спектр похож на спектр звезды с яркими линиями (звезды типа Вольфа—Райе), а затем — на разновидность звезд типа О без линий излучения и поглощения (т. е. подобный спектру центральных звезд горячих газовых туманностей, называемых планетарными).

Интересно, что, когда чисто случайно был получен спектр Новой Орла 1918 г. перед самой ее вспышкой, он оказался похож на спектр новой после вспышки. Важные

сведения о спектрах новых звезд в период между вспышками дали исследования тех новых, которые повторяют свои вспышки. О них мы будем говорить позже.

Спектр информирует о температуре новой звезды

Разнообразие спектральных стадий и сложность некоторых из них потребовали глубоких исследований. В первую очередь были установлены физические условия, существующие в новой звезде, т. е. ее температура и плотность ее оболочки.

Точной характеристикой была бы эффективная температура новой звезды, вычисляемая по полному излучению, но у горячих звезд подавляющая часть световой энергии, согласно закону излучения, выделяется в ультрафиолетовой части спектра, недоступной до последнего времени прямым измерениям. Лишь спектрографы, устанавливаемые на ракетах и искусственных спутниках, дали такую возможность для самых ярких звезд и для вспышек новых.

Но уже давно были найдены обходные пути определения температур оболочек новых звезд. Один из них, предложенный голландским астрофизиком Г. Занстрой в 1930 г., основан на свойствах самого распространенного в газовых туманностях и в новых звездах элемента — водорода. Спектр водорода (рис. 14) состоит из нескольких серий линий, каждая из серий сгущается в фиолетовую сторону и переходит в непрерывный спектр. Напомним, что, чем больше порция энергии получена атомом водорода, тем в более коротковолновой области спектра расположена линия, где он излучит эту порцию; если же атом ионизируется, то мы видим его последующее излучение в непрерывном спектре за пределом серии. В далекой ультрафиолетовой области спектра расположена серия Лаймана со своим непрерывным спектром, в оптической области — серия Бальмера и ее непрерывный спектр, а остальные спектральные серии водорода располагаются в инфракрасной области.

Свечение в линиях водорода и других элементов в спектрах газовых туманностей происходит вследствие того, что атомы в них поглощают мощное ультрафиолетовое излучение горячей звезды в области непрерывного спектра серии Лаймана, а потом эта энергия излучается уже более

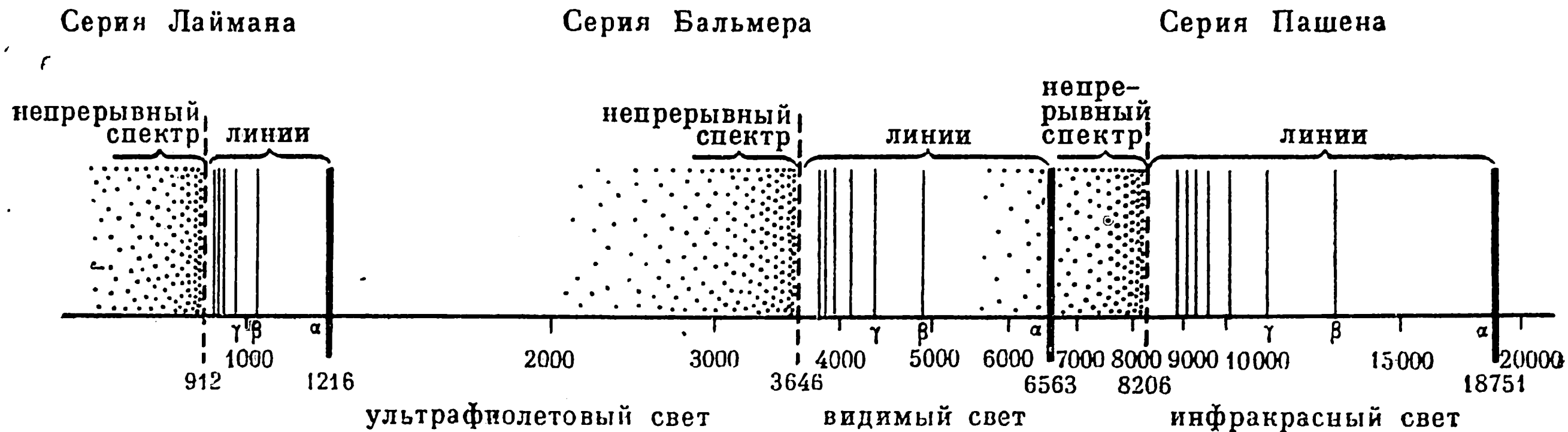


Рис. 14. Схема спектра водорода

По горизонтали размечены длины волн в ангстремах, вверху — серии спектральных линий Лаймана, Бальмера и Пашена. В каждой серии имеются линии α , β , γ и т. д., пунктиром отмечен предел серии, после которого начинается непрерывный спектр серии

мелкими порциями в бальмеровской и других сериях спектра. Занстра показал, что из каждого кванта непрерывного спектра серии Лаймана газовая туманность образует только один квант в бальмеровском участке спектра. Поэтому, измерив силу линий излучения водорода и его непрерывного спектра в оптически наблюдаемой области спектра, можно вычислить и величину энергии в ненаблюдаемом непосредственно ультрафиолетовом участке спектра, а по ней найти соответствующую температуру центральной звезды.

Другие способы отыскания температуры центральных звезд в газовых туманностях и новых звездах были предложены в 1932 г. советским астрофизиком В. А. Амбарцумяном. Так, по сопоставлению силы излучения в линиях водорода и ионизованного гелия, расположенных рядом в спектре, можно найти наивысшую оценку возможной температуры звезды, а по сравнению энергий, излучаемых в запрещенных линиях дважды ионизованного кислорода, — наименьшую оценку. Этот способ основан на знании причин свечения запрещенных линий.

Источник энергии свечения запрещенных линий в конечном счете тот же самый, что и для разрешенных линий, — сильное ультрафиолетовое излучение звезды. Оно ионизует атомы водорода. При ионизации часть энергии ультрафиолетового кванта расходуется на освобождение электрона и возвращается в виде свечения линий водорода. А остальная часть ее уносится электроном. Чем выше температура звезды, тем больше кинетическая энергия этих свободных электронов. Когда атом ионизованного кислорода сталкивается в оболочке новой звезды со свободным электроном, последний передает ему часть своей кинетической энергии, которой оказывается достаточно для свечения этого атома в запрещенной линии. Конечно, если бы газовая среда была плотнее, атом кислорода не успел бы излучить эту энергию в запрещенной линии, так как еще раньше столкнулся бы с другим электроном и передал ему энергию. Но в разреженной среде столкновения редки и все обходится без приключений: свечение в запрещенной линии появляется.

Отношение энергий запрещенных линий дважды ионизованного кислорода и водорода характеризует определенным образом отношение энергий в ультрафиолетовом участке спектра звезды, находящемся за пределом серии

Лаймана. По этому отношению можно, следовательно, тоже рассчитать температуру. Поскольку причина свечения кислорода в запрещенных линиях, как мы только что видели, — кинетическая энергия электронов, то температуру, вычисленную таким путем, называют «электронной» или «кинетической» температурой туманности или оболочки новой звезды.

В табл. 8 приведены температуры новой звезды, полученные разными способами для важнейших спектральных

Таблица 8
ТЕМПЕРАТУРЫ ОБОЛОЧКИ НОВОЙ ЯЩЕРИЦЫ 1936 г., НАЙДЕННЫЕ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ В ПЕРИОД ВСПЫШКИ ЗВЕЗДЫ

Время в сутках, считаемое с максимума	Звездная величина новой, m	Температура, °K				Спектральные стадии, присутствующие в спектре новой
		цветовая	ионизационная		электронная	
			по водороду	по дважды ионизованному азоту		
0	2	10250	—	—	—	Предмаксимальная
2	3	7800	—	—	—	Предмаксимальная и главная
5	4	10500	—	—	—	Главная, диффузно-искровая, орсионов
13	5	12500	32500	63000	—	То же
26	6	14000	32500	66000	9200	Главная, небулярная
39	6,5	—	34000	67500	9200	Небулярная
46	7	34000	33500	71000	9200	»
66	8	14300	39500	75000	9200	»

стадий. Они значительно различаются при измерениях разными способами. Такое в астрофизике случается довольно часто. Это не обязательно связано с приближенностью измерений или несовершенством методов, а может указывать на сложность, неоднородность условий в звезде. Именно так обстоит дело с новыми звездами.

Скорости расширения, размеры и плотности оболочек

Смещение линий поглощения в спектрах новых звезд свидетельствует о расширении их оболочек. Измерение смещения линий в спектрах показывает, что скорость расширения слоев, создающих эти линии поглощения, не

остается постоянной, а различна для разных спектральных систем и даже возрастает иногда в течение стадии.

В табл. 9 показаны скорости расширения медленных и быстрых новых звезд на разных спектральных стадиях. Прежде всего обнаруживается, что у очень быстрой новой скорости расширения велики, а у медленной — значительно меньше. Это, между прочим, дает ключ к объяснению существования быстрых и медленных новых. Звезда с быстро расширяющейся оболочкой быстро взлетает к максимуму блеска, а затем быстро падает до минимума, форсированно пробегая все спектральные стадии.

Таблица 9
СКОРОСТИ РАСШИРЕНИЯ ОБОЛОЧЕК НОВЫХ ЗВЕЗД,
ВЫБРОШЕННЫХ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ, км/сек

Новая, год вспышки	Характер изменения блеска	Предмакси- мальный спектр	«Главный спектр»	Диффузно- искровой спектр	Орионов спектр	Небулярный спектр
Орла 1918	Очень быстрая	1300	1600	2200	3000	Линий поглоще- ния для измере- ний скоростей не имеется
Лебедя 1920	То же	520	740	1400	2500	То же
Ящерицы 1936	»	1100	2300	2000	3300	»
Персея 1901	»	700	1500	3500	3650	»
Близнецов 1912	Быстрая	400	850	1500	1600	»
Ящерицы 1950	»	—	900	1500	2500	»
Живописца 1925	Медлен- ная	100	300	700	1300	»
Геркулеса 1934	То же	175	350	500	800	»

В эпоху максимума блеска — в предмаксимальном и главном спектре — скорости расширения сравнительно умеренны, но, когда появляются линии поздних спектральных стадий, они указывают на значительно более высокие скорости. Естественное объяснение этого явления, как мы увидим, заключается в том, что диффузно-искровой и орионов спектры образуются веществом, выброшенным из звезды уже после главной вспышки.

Что же является в таком случае скоростью расширения самой оболочки новой звезды? Основная, главная оболочка, которую впоследствии удастся видеть на фотографиях, — это та, что создает «главный спектр». По скорости

главной оболочки мы можем, следовательно, рассчитать радиус оболочки на каждый момент явления новой звезды. Для сравнения с размерами обычных звезд радиусы оболочек удобно выражать в радиусах нашего Солнца (700 000 км). Эти данные содержатся в табл. 10.

Таблица 10

РАДИУСЫ ОБОЛОЧКИ И ФОТОСФЕРЫ НОВОЙ ЯЩЕРИЦЫ 1950 г.
(в радиусах Солнца)

Стадия	Сутки после максимума	Абсолютная величина, <i>m</i>	Радиус фотосферы	Внешний радиус оболочки
Максимум	0	—7,5	150	150
«Главный спектр»	6	—6,5	90	816
Орионов спектр минимум	29	—4,4	5,5	3372
Орионов спектр максимум	31	—5,0	9,6	3705
Переходный спектр минимум	53	—3,6	2,9	6149
Переходный спектр максимум	60	—5,0	9,8	6816
Начало небулярной стадии	112	—2,9	1,7	12593

В этой же таблице приведены радиусы фотосфер новой звезды, т. е. радиусы внутренней области оболочки новой звезды, которая непрозрачна для излучения изнутри. Радиус фотосферы R зависит от ее температуры и абсолютной величины звезды:

$$\lg R = 5900/T - 0,2 M - 0,02.$$

В случае новых звезд расчеты показывают огромные изменения радиуса фотосферы. Разность же между радиусом оболочки и радиусом фотосферы дает представление о гигантской толщине обрабатываемого слоя, где образуются линии оболочки новой.

Важной физической характеристикой оболочки новой звезды является ее плотность. Способы определения плотности довольно разнообразны. Впервые ее удалось оценить в 1933 г. советским астрофизикам В. А. Амбарцумяну и Н. А. Козыреву. Они рассчитали плотность в фотосфере новой в момент максимума блеска, пользуясь температурой и размерами оболочки звезды, а также по интенсивностям некоторых ярких линий спектра новой в небулярной стадии.

Чаще всего теперь определяют плотность оболочки новой по интенсивности линий водорода. Разработанные для этого способы дают количество свободных электронов в кубическом сантиметре оболочки (так называемую электронную концентрацию). Поскольку оболочки новых звезд почти целиком состоят из ионизованного водорода, то свободные электроны в них появляются главным образом за счет ионизации водорода. Следовательно, электронная концентрация характеризует количество ионов водорода или практически в нашем случае — полное число атомов водорода в куб. сантиметре. Если умножить его на массу протона ($1,66 \cdot 10^{-24}$ г), то мы найдем плотность вещества оболочки в слое, где возникает линия излучения водорода.

Наблюдения показали, что по мере расширения оболочки ее плотность убывает, несмотря на то, что в оболочку продолжает непрерывно поступать вещество из звезды. Зная скорость расширения оболочки и изменение ее плотности с глубиной, можно вычислить массу оболочки новой звезды на разных ее стадиях.

Советский астрофизик И. М. Копылов подсчитал массы оболочек десяти новых звезд в небулярных стадиях. Они получились невелики: от 0,00002 до 0,001 масс Солнца. Это указывает на то, что при вспышке от звезды отделяется небольшая масса газа, а сама звезда сохраняется в целости. Поэтому после вспышки она возвращается к своей нормальной звездной величине.

Что касается масс самих новых звезд, то их удастся оценить в редких случаях, и мы будем говорить об этом позже. Обычные новые оказались карликами с массами от одной солнечной до нескольких десятых солнечной.

Ознакомление с явлениями вспышки новой звезды и ее физическими характеристиками подводит нас к пониманию, что собой представляет эта вспышка и чем является сама новая звезда. Но прежде чем разобраться в этом, мы должны познакомиться с другими взрывными звездами, изучение которых оказалось очень полезным для объяснения явления новых звезд.

ОСОБЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ НОВЫХ ЗВЕЗД

Повторные новые — обычные новые или особый класс?

Мы познакомились с явлениями, протекающими при вспышке обычной новой звезды. Однако встречаются разновидности новых, вспышки которых отличаются теми или иными особенностями от стандартных. Поэтому наряду с обычными новыми звездами отдельно рассматриваются их разновидности: повторные новые, звезды типа U Близнецов и новоподобные звезды.

Ближе всего к обычным новым звездам так называемые повторные новые. Как говорит само название, их главное отличие от обычных новых заключается в том, что их вспышки повторяются через определенное время. Впервые это было обнаружено в 1902 г., когда вспыхнула Новая Компаса, имевшая уже до этого вспышку в 1890 г. Явление повторной вспышки новой звезды, естественно, показалось нехарактерным для обычных новых, и эту звезду перевели в класс новоподобных, куда, как в мусорную корзину, до сих пор отправляют различного рода уникальные случаи вспышек. Но вскоре были открыты еще несколько повторных новых, а Новая Компаса к настоящему времени повторила вспышки еще два раза.

Сейчас известно семь повторных новых. Они перечислены в табл. 11 вместе с годами их вспышек, длительностью циклов между вспышками и разностями звездных величин в максимуме и минимуме (амплитудами) блеска. Тут же приведены три обычные новые, у которых также подозревается цикличность вспышек. Но все ли повторные новые выявлены среди двухсот наблюдавшихся к настоящему времени новых звезд? Конечно, нет.

Дело в том, что, пока новая не повторит вспышки, она ничем не отличается от остальных новых, имевших един-

ПОВТОРНЫЕ НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

Новая	Годы вспышек	Звездная величина, m		Амплитуда, m	Средний цикл, годы
		в максимуме	в минимуме		
Северной Короны	1866, 1946	2,4	11,4	9,0	80
Змееносца	1898, 1933, 1958, 1967	5,3	12,3	7,0	30
Компаса	1890, 1902, 1920, 1944, 1967	7,0	14,5	7,5	19
Стрелы	1913, 1946	7,0	15,5	8,5	33
Стрельца	1901, 1919, 1973	7,2	14,4	7,2	18
Водолея	1907, 1962	8,0	16,6	8,6	55
Скорпиона	1863, 1906, 1936	8,8	19	10,2	37
Орла 1918	125, 1918	—1	12	13	1793
Персея 1901	839, 1901	0	13	13	1062
Скорпиона	393, 1600	0	?	?	1207

ственную вспышку; среди повторных новых есть и быстрые и медленные: абсолютные величины повторных новых такие же, как у обычных новых. Правда, по амплитудам блеска, спектральным деталям и другим особенностям повторные новые сходны между собой больше, чем с новыми, не имевшими повторных вспышек. Так, почти все повторные имеют амплитуды колебания блеска, меньшие, чем новые, не повторявшие вспышек. Но все же этого недостаточно, чтобы считать повторные каким-то особым классом новых звезд.

В 1934 г. советские астрономы П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркин сравнили амплитуды и циклы повторных новых звезд и переменных типа U Близнецов (иногда называемых еще карликовыми новыми). И оказалось, что, чем больше амплитуда, тем больше и цикл между вспышками. Другими словами, стала вырисовываться взаимосвязь: у переменных типа U Близнецов амплитуды небольшие и короткие промежутки между вспышками, а у повторных новых и то и другое больше, следовательно, если обычные новые звезды имеют еще большие амплитуды блеска, то они должны повторять свои вспышки только через более длительные промежутки времени.

Паренаго и Кукаркин обратили внимание на Новую Северной Короны 1866 г., у которой амплитуда блеска

была где-то между большими амплитудами обычных новых и небольшими амплитудами повторных. Если обнаружившаяся взаимосвязь между амплитудами и циклами существует в действительности, то эта новая звезда по их расчетам должна была повторить вспышку между 1926 и 1966 гг.

И вот, 8 апреля 1946 г. любитель астрономии, путевой обходчик А. С. Каменчук, хорошо знавший звездное небо, обнаружил в созвездии Северной Короны «лишнюю» звезду 2-й величины (такую величину в этом небольшом созвездии имела лишь самая яркая звезда — Гемма). Это была повторная вспышка Новой 1866 г. Астрономы-профессионалы заметили эту звезду лишь 9 апреля, когда она уже стала убывать в блеске.

Предсказание вспышки Новой в Северной Короне сильно укрепило гипотезу Паренаго и Кукаркина о повторности вспышек обычных новых. Но пока это единственная повторная новая с длинным циклом. Астрономы ждут повторных вспышек других новых звезд, наблюдавшихся в XVII—XIX вв. Так, по предположениям советского астронома П. Г. Куликовского, в ближайшем десятилетии возможно повторение вспышки Новой Ориона 1667 г.

Решающим подтверждением гипотезы было бы обнаружение повторности вспышек обычных новых звезд с большими амплитудами. Но интервал между их вспышками составляет тысячи лет, и ожидание их повторения выглядит безнадежным.

К счастью, еще в 1954 г. советский астроном И. М. Копылов заметил, что закономерности для повторных новых и карликовых новых следует рассматривать отдельно, так как эти классы взрывных звезд существенно различаются между собой по многим признакам, начиная с абсолютных величин. Теперь это нашло подтверждение в исследовании московских астрономов Ю. Н. Ефремова и П. Н. Холопова. При этом длительность цикла обычных новых значительно уменьшается.

Однако имеется еще одна возможность подтвердить или отвергнуть повторность обычных новых звезд. Дело в том, что в древних китайских, японских и европейских хрониках имеются записи о появлении комет, вспышках ярких звезд и других небесных явлениях. Ахиллесовой пятой этих старинных записей является грубость указаний положения на небе, нечеткость характеристики явления.

Сейчас собраны данные о более 150 древних вспышках новых и сверхновых звезд и среди них, несомненно, встречаются и ярчайшие повторные новые. Одни из них еще повторят вспышки в будущем, а иные повторили их у нас на глазах, только прежние их вспышки были забыты.

В древности замечались, конечно, только самые яркие вспышки — не слабее 3-й звездной величины, поэтому мы можем проверить гипотезу повторности обычных новых по самым ярким вспышкам, например по Новой Орла 1918 г., Новой Персея 1901 г. и Новой Кормы 1942 г. Все они были быстрыми новыми и в максимуме превосходили 1-ю звездную величину. Следовательно, простым глазом они могли быть видны не более месяца, а бросались в глаза от силы дней десять. Если же в этот период была пасмурная погода, яркую вспышку могли и не заметить.

Тем не менее в районе вспышки Новой Орла 1918 г. европейские наблюдатели видели вспышки около 125 г. и в 1612 г., но ряд соображений говорит, что в 1612 г. наблюдалась другая новая звезда. Интервал между вспышкой в 125 г. и вспышкой 1918 г. составляет 1793 года. Вполне возможно, что одна или даже две вспышки в этом интервале были наблюдателями пропущены. На месте Новой Персея 1901 г. была замечена вспышка в 839 г., цикл между вспышками этой звезды 1062 года. Что касается вспышек на месте Новой Кормы 1942 г., то их не было замечено вследствие, очевидно, двух обстоятельств: Корма — южное созвездие, наблюдаемое короткое время весной, а, судя по большой амплитуде вспышек, цикл между ними должен насчитывать несколько тысячелетий.

На рис. 15 мы видим зависимость «амплитуда—цикл» повторных новых, как она выглядит в настоящее время. Можно считать, что мы имеем новые подтверждения повторности обычных новых. Но все ли новые с малыми амплитудами повторяют вспышки? Оказывается, есть Новая Циркуля 1906 г., амплитуда которой всего 4,7 звездной величины, а повторных вспышек у нее не наблюдается. Предполагают, что в действительности эта новая в минимуме блеска значительно слабее, а блеск ее сливается с яркой соседней звездой, не имеющей к ней никакого отношения. Но пока это утверждение не проверено наблюдениями.

Повторные новые оказались удобными для изучения спектральных свойств новых звезд между вспышками.

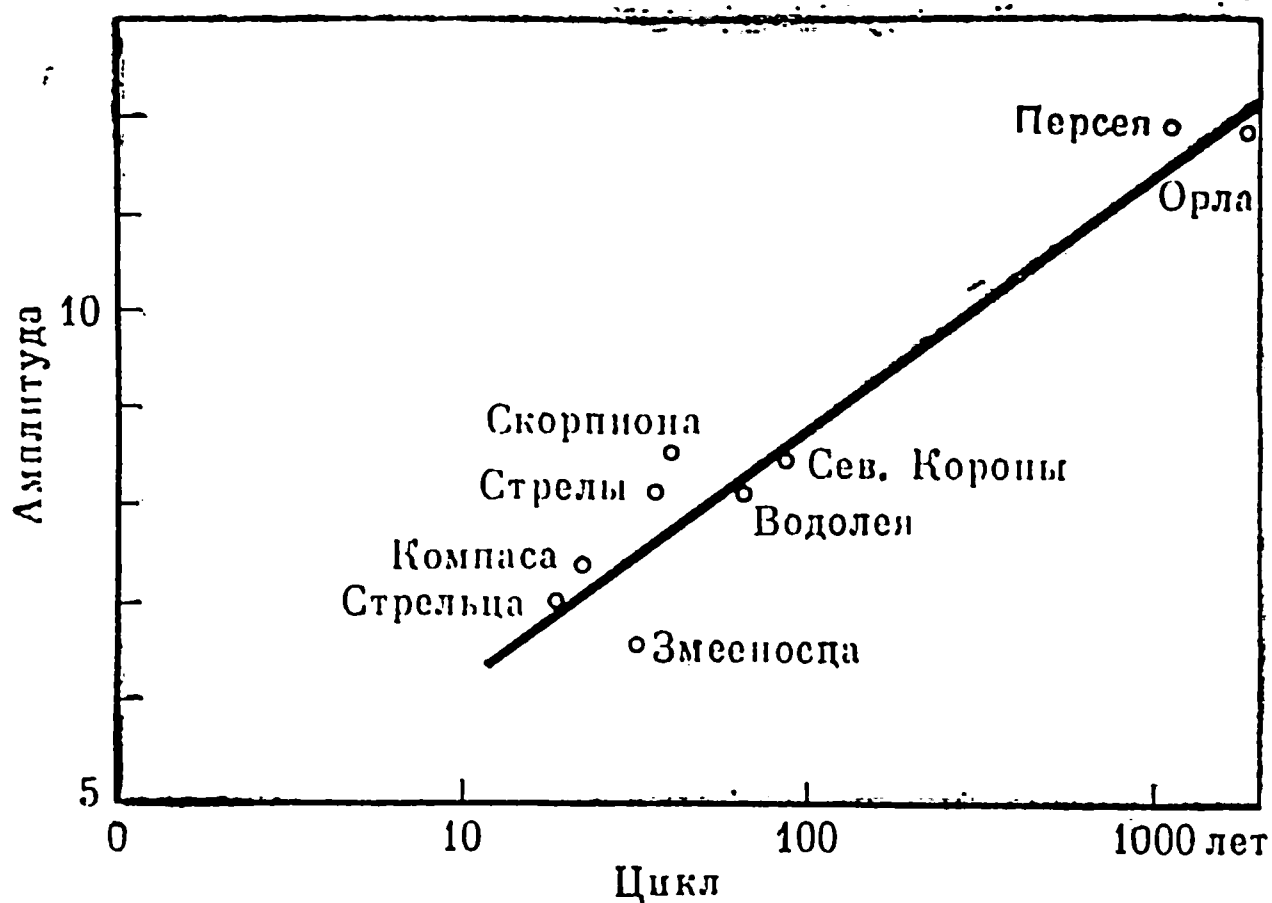


Рис. 15. Зависимость «амплитуда — цикл» для повторных новых

В целом спектры обычных и повторных новых в минимуме оказались одинаковыми. В период вспышки новые с малыми амплитудами блеска, т. е. повторные, имеют некоторые отличия в спектрах от обычных новых: более слабый непрерывный спектр, корональные линии и т. д. Это говорит о более высокой разреженности и меньшей массе оболочек, выбрасываемых при вспышке, что вполне соответствует небольшой амплитуде вспышки такой новой звезды.

Взрывные звезды типа U Близнецов

В 1955 г. английский искатель астероидов Дж. Хинд обнаружил в созвездии Близнецов быстро разгоревшуюся звезду. 15 декабря она была 9-й величины, через три недели ослабела до 12-й и впоследствии вернулась к 14-й величине. А приблизительно через сто суток ее вспышка повторилась. К настоящему времени у этой звезды наблюдалось уже несколько сотен вспышек. Интервалы между вспышками имеют нестрого постоянную длительность, так же как неодинакова и яркость самих вспышек. Таким образом, по характеру кривой блеска переменная несколько напоминала новую звезду, но многими чертами от нее отличалась.

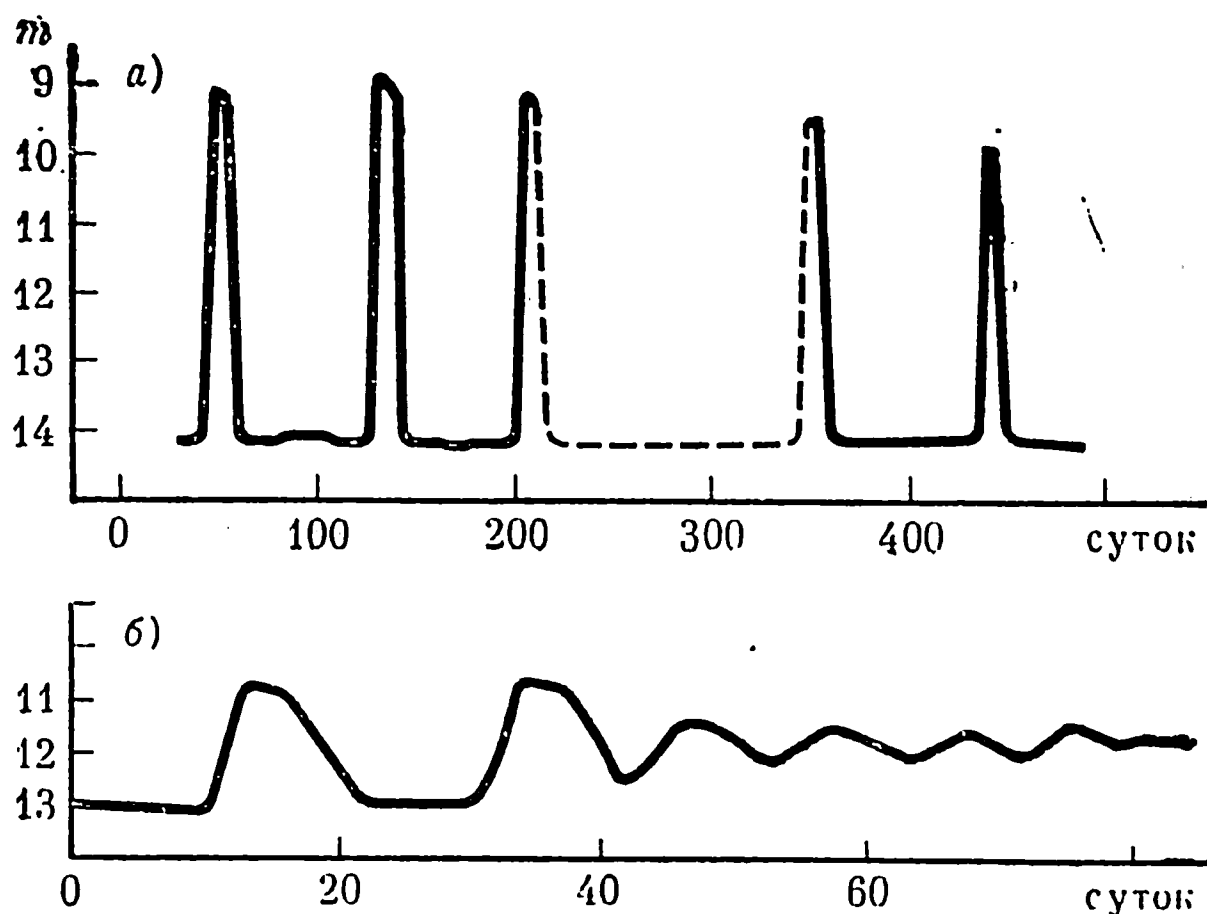


Рис. 16. Кривые блеска U Близнецов (а) и Z Жирафа (б)

Сейчас известно более ста пятидесяти переменных типа U Близнецов, как называли их по первой открытой Хиндом звезде. Все они характеризуются циклическим (т. е. нестрого периодическим) повторением вспышек. Кроме того, есть немногочисленная разновидность переменных этого типа, у которых ослабление блеска идет медленно, иногда оно задерживается, не снижаясь до старого минимума, и звезда переживает до следующей вспышки (рис. 16).

Для малых амплитуд блеска (в две звездные величины) циклы составляют несколько суток, а для амплитуды в пять-шесть величин — сотни суток. Эта взаимосвязь амплитуд и циклов открыта П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркиным.

Абсолютные величины переменных типа U Близнецов в минимуме блеска получаются от 10 до 7,5.

Исследование характера движения переменных типа U Близнецов и их размещения в Галактике привело к выводу, что они, как и новые звезды, не населяют спиральные рукава, а принадлежат к населению галактического диска.

Таким образом, по ряду признаков переменные типа U Близнецов обнаруживают сходство с новыми звездами, но тем не менее являются самостоятельным классом взрывных звезд. Иногда употребляемое теперь образное выражение «карликовые новые» в сущности неправильно, так

как причины увеличения блеска у этих двух классов звезд, судя по спектрам, разные.

В эпоху между вспышками спектр U Близнецов непрерывный, имеет яркие линии излучения водорода и гелия. Цветовая температура непрерывного спектра около 5500° , что соответствует карлику немного холоднее Солнца (G5). Как недавно выяснилось, в эпоху максимума блеска спектр этой переменной повышает интенсивность, а яркие линии слабеют. При вспышке U Близнецов в отличие от обычных новых, по-видимому, не происходит отделения или расширения оболочки, а повышается по каким-то причинам ее температура до $15\,000^{\circ}$, что и ведет к возрастанию блеска.

Несколько типов новоподобных звезд

Кроме звезд типа U Близнецов обнаружен ряд звезд, сходных с новыми по тем или иным признакам, но не являющихся типичными новыми. Их обычно называют новоподобными. Каждый представитель класса новоподобных исключительно своеобразен, и они образуют пестрый список объектов.

Наиболее четко среди новоподобных звезд выделяются переменные типа Z Андромеды, или симбиотические звезды. Их известно около двух десятков. Переменные этого типа по временам скачками изменяют блеск на несколько величин, но амплитуды их значительно меньше, чем у новых (не более 5^m). Зато изменения в спектрах сходны с изменениями в спектрах новых.

Между вспышками в спектре Z Андромеды присутствуют линии, аналогичные линиям спектров новых звезд и горячих газовых туманностей. Во время вспышки звезда выбрасывает газовую оболочку, расширяющуюся со скоростью около 100 км/сек. В это время в спектре сильны яркие полосы окиси титана. Колебания блеска и спектра этой новоподобной звезды напоминают колебания новой в переходной стадии.

В спектре звезд типа Z Андромеды обнаруживается удивительное сочетание особенностей горячей и холодной звезд. По непрерывному спектру цветовые температуры получаются всего 5000° в минимуме и $10\,000^{\circ}$ в максимуме вспышки, а яркие линии спектра указывают на температуру в десятки тысяч градусов. В спектрах некоторых из

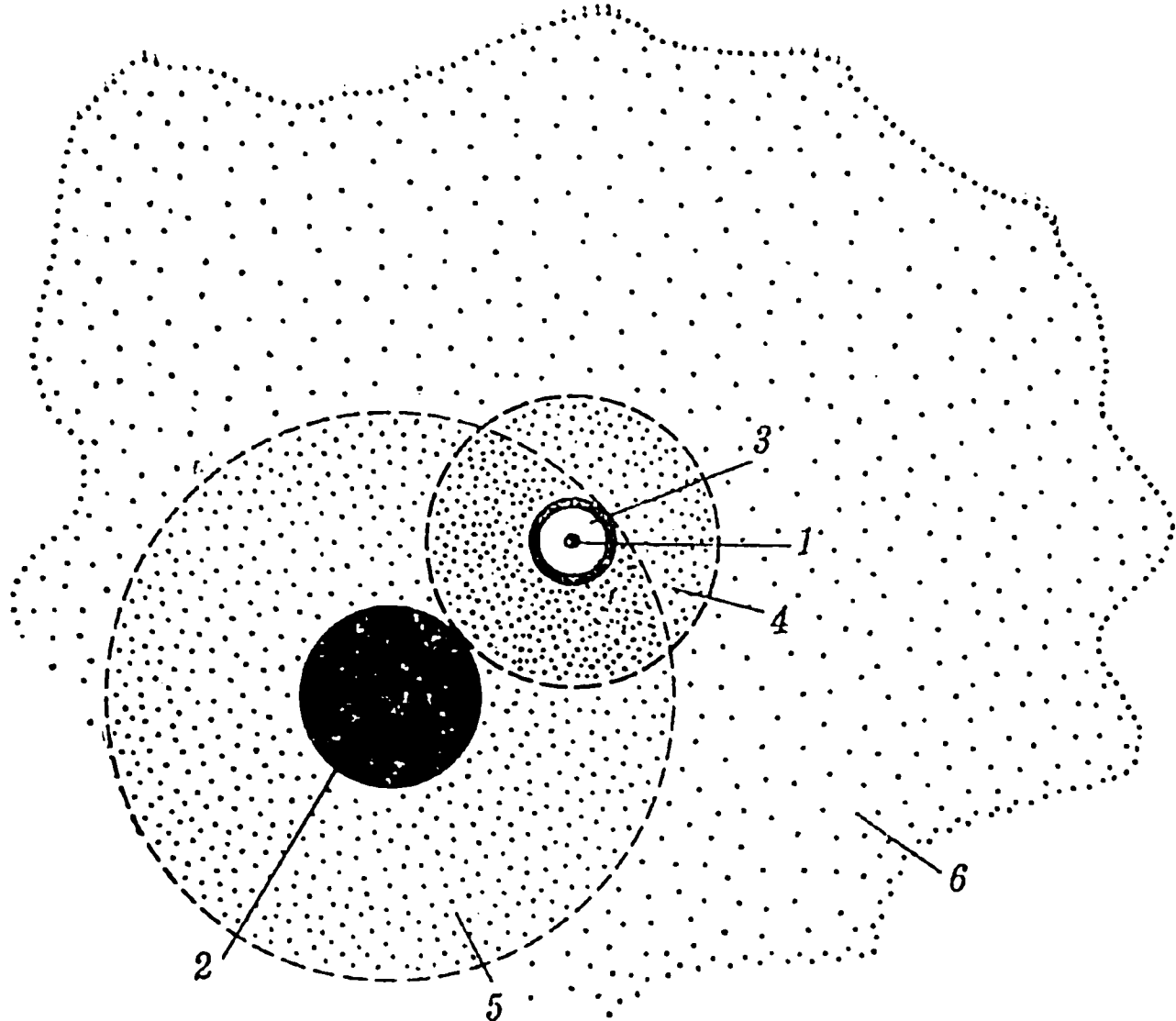


Рис. 17. Модель симбиотической звезды: холодный красный гигант и горячая звезда с яркими линиями излучения в спектре окружены протяженными разреженными оболочками и обе погружены в общую протяженную туманность. Каждая из оболочек и туманность обнаруживают свое присутствие спектральными линиями излучения

1 — горячая звезда, 2 — красный гигант, 3 — оболочка, излучающая линии H и He, 4 — разреженная оболочка, излучающая запрещенные линии ионизированного железа, 5 — оболочка, излучающая разрешенные и запрещенные линии ионизированного железа, 6 — протяженная туманность с запрещенными линиями ионизированного кислорода и неона

этих переменных обнаружено периодическое изменение смещения линий. Это указывает на то, что звезда является двойной. Как правило, главная звезда в такой системе — горячая типа Вольфа—Райе или класса O, а спутник — разреженный холодный гигант типа K или M. Обе звезды погружены в общую газовую туманность. Вспыхивает главная горячая звезда. Она же поддерживает высокую температуру оболочки с линиями излучения. Зато красный гигант дает больше холодного излучения в непрерывном спектре переменной (рис. 17).

Такое сочетание в тесной двойной системе с туманностью довольно контрастных по свойствам звезд дало право называть переменные такого типа симбиотическими. Нужно

сказать, что среди симбиотических звезд встречаются и такие, у которых не наблюдается колебаний блеска или признаков двойственности по периодическому смещению линий в спектре. Тем не менее сложные комбинированные спектры оказываются достаточными для отнесения объектов к этому замечательному типу звезд.

Кроме симбиотических существует еще одна группа звезд, которая сходна с новыми особенностями своего спектра. Это звезды типа Р Лебеда.

Сама Р Лебеда появилась как звезда 3-й величины в 1600 г. и сохраняла свой блеск неизменным два года, а затем ослабела до 6-й величины. В 1655 г. ее вспышка повторилась снова. С 1715 г. ее блеск колеблется около 5-й величины.

Спектр Р Лебеда — сверхгиганта типа В — очень своеобразен. Он отличается присутствием ярких линий водорода и гелия, окаймленных с фиолетовой стороны темными линиями поглощения. Эти особенности спектра Р Лебеда напоминают спектр новой вскоре после максимума блеска. Создается впечатление, что звезда как бы застыла в максимальной стадии новой. Этой удивительной переменной присвоили титул «перманентной новой». По смещению линий в спектре Р Лебеда установлено, что она непрерывно выбрасывает газ со скоростью до 300 км/сек. Р Лебеда имела вспышки и в прошлом, но не была обычной новой. Советский астроном Б. А. Воронцов-Вельяминов считает, что новоподобные типа Р Лебеда — это массивные горячие сверхгиганты, у которых иногда на наших глазах образуется протяженная расширяющаяся атмосфера, где сложились условия для образования ярких линий.

К типу Р Лебеда относят звезды, сходные с нею по спектру, хотя у многих из них увеличение блеска не наблюдалось. Все они — горячие сверхгиганты, самые яркие звезды в галактиках. Например, в Большом Магеллановом Облаке ярчайшей звездой является звезда такого типа, называемая переменной S Золотой Рыбки. Ее абсолютная величина около — 9^m, 5!

И еще одна черта объединяет эти переменные звезды с новыми: как правило они также оказываются двойными.

ЧТО СКРЫВАЕТСЯ ЗА ВСПЫШКАМИ НОВЫХ ЗВЕЗД?

Новые звезды — двойные

К середине нашего столетия объяснение явления вспышки новой звезды свечением ее расширяющейся оболочки было уже бесспорным. Астрономов все более интересовали внутренние причины вспышек новых и в связи с этим их свойства в спокойной стадии после вспышки. Казалось, что от наблюдений за блеском и поведением спектральных линий бывших новых звезд нельзя получить ничего неожиданного, а главные новости могли дать успехи теории внутреннего строения звезд. И все же главную сенсацию в новых звездах, приблизившую нас к пониманию их природы и приоткрывшую завесу тайны их вспышек, принесли именно наблюдения блеска и спектров и объяснение их теорий в первую очередь не физического, а механического характера.

Речь идет об обнаружении двойственности многих новых звезд и других взрывных переменных.

В 1954 г. американский астроном М. Уокер обнаружил, что Новая Геркулеса 1934 г. является затменно-двойной системой с очень коротким периодом в 4 часа 39 минут. Напомним, что система из двух звезд выглядит для наблюдателя на Земле как затменная звезда, если луч зрения лежит в плоскости орбиты этой системы. Тогда при обращении звезды этой системы поочередно заслоняют друг друга. В результате мы видим систематические колебания блеска звезды и периодическое изменение доплеровского смещения спектральных линий, отражающее орбитальные движения звезд двойной системы.

Изучение двойной системы Новой Геркулеса показало, что кроме обычных она имеет еще небольшие хаотические колебания блеска, а на орбитальное движение в системе указывали только линии водорода и гелия в фио-

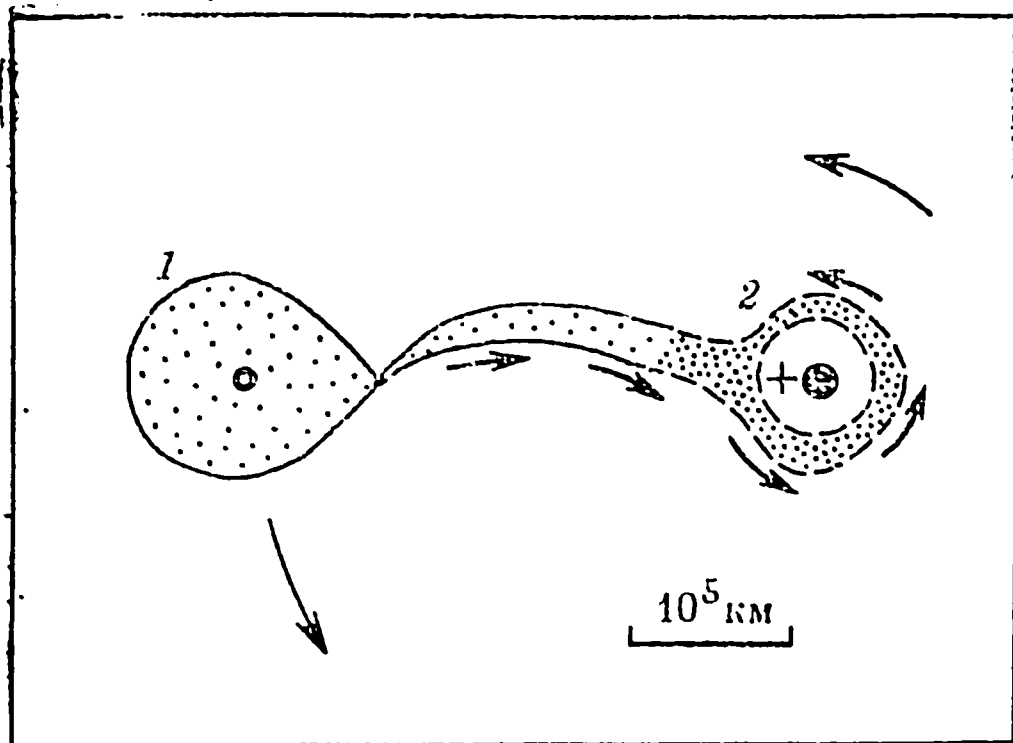


Рис. 18. Модель двойной системы Новой Стрелы 1913 г. Крестом отмечен центр масс системы

«Груша» (1) — разреженный красный гигант-спутник, а черный кружок (2) — горячая звезда со свойствами белого карлика, являющаяся главным компонентом системы. Стрелки показывают вытекание газа из спутника и образование кольца вокруг горячей звезды. В Новой Геркулеса 1934 г. спутник является карликом и в спектре не обнаруживается

летовой части спектра. Линии же водорода в красной части спектра не показывали периодического доплеровского смещения; они, очевидно, принадлежат туманности, обволакивающей двойную звезду. К тому же не было найдено никаких следов спектра другой звезды.

Такая странная ситуация сильно напоминала случай симбиотической звезды. Система, по-видимому, состоит из горячей звезды, сходной по характеристикам с белым карликом, и из темного спутника, который регулярно затмевает главную звезду. Горячая звезда, предполагают, окружена кольцом горячего газа, движущегося вместе с ней по орбите вокруг общего центра тяжести двойной системы (рис. 18). Именно этот газ и показывает орбитальное движение в спектре системы.

Так раскрылась структура одной из новых звезд. Но все ли новые устроены по такому образцу и являются двойными системами? Этим вопросом занялись американские астрономы Р. Крафт и Дж. Мамфорд и польские астрономы В. Кжеминьский и Б. Пачиньский. Спектроскопическим исследованиям были подвергнуты несколько новых звезд, а также переменных типа U Близнецов и некоторые новоподобные.

Крафт обратил внимание на то, что даже если все новые являются двойными с тесно расположенными друг к другу звездами, то лишь некоторые из них будут для нас затменными. Нужно искать не колебания блеска, а в первую очередь периодические изменения лучевых скоростей в спектрах, вызванные их орбитальными движениями. И все же часть бывших новых звезд может оказаться и без следов орбитального движения в спектрах — это в случае, если луч зрения наблюдателя проходит близко к направлению оси орбитального движения системы.

У большинства исследованных новых звезд и им подобных объектов действительно были обнаружены периодические изменения лучевых скоростей с периодом от нескольких часов до нескольких месяцев. Были и ожидаемые исключения. Отсюда последовал важный вывод: новые звезды и сходные с ними объекты являются, как правило, двойными системами. Осторожность такой формулировки объясняется тем, что мы пока не видели спутников и главных звезд в этих системах отдельно, а заключение о двойственности вывели из поведения спектральных линий. Кроме того, имеются случаи, когда спектральные данные не показывают признаков двойственности звезд, бывших новыми; в этом случае можно думать, что орбиты их компонент случайно лежат в плоскости, перпендикулярной к лучу зрения наблюдателя.

Как и Новая Геркулеса, те новые звезды (в том числе и повторные новые), у которых обнаружены следы орбитального движения, состоят из главной звезды — горячего субкарлика спектрального типа В и холодного темного спутника спектральных типов К или М. Спутник светит очень слабо и в спектре не проявляет себя заметными линиями. Этим новые звезды отличаются от симбиотических (новоподобных) звезд.

Горячая звезда в системе, являющейся новой, окружена газовым кольцом. Откуда оно появилось? Дело заключается в свойствах двойных систем. У любой системы, будь то звезда со спутником или Земля и Луна, на оси, проходящей через центры главного тела и спутника, имеются две точки, где уравниваются силы притяжения обоих тел. С механической точки зрения эти точки представляют собой брешь в сфере тяготения этой системы. Холодный спутник через такую брешь систематически теряет веще-

ство, которое перетекает в газовое кольцо вокруг горячей главной звезды. Часть газа из кольца может ускользнуть и в межзвездное пространство через внешнюю точку равновесия.

Как только выяснились контуры процесса, происходящего в тесных двойных системах новых звезд, стало ясно, что эта взаимодействующая комбинация (красный карлик — горячий субкарлик и газовый диск) не случайна, а имеет прямое отношение к самому явлению вспышки новой звезды. Не связано ли оно с накоплением газовой массы в кольце вследствие меньшего оттока газа через внешнюю точку? Не взаимодействуют ли каким-то образом кольцо и главная звезда? К сожалению, пока на эти вопросы нет ответа. Предстоят исследования и многочисленные расчеты.

А пока спектральные свидетельства двойственности и наличия газового кольца позволили оценить возможные массы и размеры звезд, входящие в двойные системы новых. На этот счет в табл. 12 приведены довольно любопытные сведения. Для быстрой обычной новой обе звезды получились массивными, а у медленной новой — скромными по массе. Особенно интересно, что у повторной Новой Стрелы (период обращения этой затменной двойной 82 минуты!) масса холодного спутника особенно мала. Зато у другой повторной новой, как, впрочем, и у некоторых обычных, масса холодного спутника больше, чем масса горячей звезды, и титул главной звезды в системе оставлен за ней только потому, что она господствует

в оптическом излучении двойной системы, а ее красный компаньон дает о себе знать лишь затмениями, если система на наше счастье еще является и затменной.

К сожалению, пока исследовано немного бывших новых звезд и по одному-двум примерам нельзя делать категорические заключения о том, как влияют массы и соотношение масс горячей и холодной звезды на мощность вспышек новых, их характер и длину цикла.

После того как была обнаружена двойственность новых, следы двойственности были найдены и у некоторых новоподобных звезд, не имевших явных вспышек, не говоря уже о симбиотических, двойственность которых была известна издавна.

Довольно любопытным оказался факт обнаружения двойственности ряда переменных типа U Близнецов. Они во многом похожи на двойные звезды, бывшие новыми, но имеют и заметные отличия. Особенно ценно, что у переменных этого типа удастся выяснить, что, возможно, происходит в двойной системе во время вспышки. Польский астроном В. Кжеминьский по анализу кривых блеска обнаружил, что в случае переменных типа U Близнецов вспыхивает не горячая звезда, как это полагают в случае новых звезд, а более холодная звезда двойной системы. По расчетам Кжеминьского во время вспышки эта звезда на 40% увеличивает свои размеры и одновременно разогревается с 5000° до 15 000°. В таком случае новые и близкие к ним новоподобные звезды должны принципиально отличаться от взрывных переменных типа U Близнецов. Но

Таблица 12

НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ В СПОКОЙНОЙ (МИНИМАЛЬНОЙ) СТАДИИ, ОКАЗАВШИЕСЯ ТЕСНЫМИ ДВОЙНЫМИ СИСТЕМАМИ

Новая, год вспышки	Тип новой	Голубой компонент		Красный компонент		Главная звезда	Период обращения
		абсолютная величина, m	масса, $M_{\odot}$	абсолютная величина, m	масса, $M_{\odot}$		
Персея 1901	Очень быстрая	5	1,3	4,5	0,56	Обе равны	46 час
Геркулеса 1934	Медленная	7	0,12	9	0,20	Голубая	4 час 39 мин
Северной Короны 1866	Повторная	1,7	2,6	0,2	3,7	Красная	228 суток
Стрелы 1913	»	10,4	0,6	11	0,03	Обе равны	1 час 22 мин
U Близнецов	Карликовая	?	1,2	4,5	0,026	?	4 час 10 мин
AE Волося	Новоподобная	?	0,97	7	0,94	?	10 час
V Стрелы	»	-4,2	0,74	-1	2,8	Голубая	12 час 21 мин

есть уже и другая точка зрения. Уокер и итальянский астроном Г. Чинкарини обнаружили в 1968 г. по спектральным наблюдениям одной из переменных типа U Близнецов, что вспышка связана с оболочкой или кольцом вокруг главной звезды. Поэтому польский астроном Ю. Смак в 1971 г. предложил новую схему вспышки переменных U Близнецов, согласно которой за вспышку ответственно горячее пятно в кольце, окружающем главную звезду. В этом случае принципиальной разницы между переменными этого типа и новыми уже нет.

Как выглядит процесс развития вспышки новой

То, что при вспышке новой звезды произошел сильный взрыв и вокруг нее образовалась расширяющаяся оболочка, является в сущности наблюдательным фактом. Но почему, как и где произошел в новой звезде взрыв — это вопросы сложные и разобраться в них мы сможем, если составим отчетливое представление о том, как развивается вспышка новой звезды согласно наблюдаемым изменениям в блеске и в спектре.

Вследствие взрыва в звезде образуется много энергии, которая расходуется на нагревание окружающей массы газа. Поэтому по законам газового состояния резко возрастает давление газа, нарушается равновесие между наружными слоями звезды и слоем, где произошел взрыв. Наружная оболочка звезды начинает расширяться. При этом резко возрастает излучающая поверхность звезды, вследствие чего увеличивается ее световая отдача, т. е. светимость. Это мы наблюдаем как повышение блеска звезды.

По мере расширения наружных слоев их плотность быстро убывает, поэтому радиус фотосферы или зоны, непрозрачной для непрерывного излучения звезды, растет значительно медленнее, чем радиус расширяющейся оболочки. Наступает момент, когда радиус фотосферы достигает максимальной величины, а затем начинает отступать в глубь оболочки. Поскольку при этом площадь излучающей поверхности быстро сокращается, блеск звезды, достигнув максимума, начинает падать.

Следует напомнить, что при возрастании радиуса фотосферы ее температура систематически убывает, так как

фотосферой до максимума блеска служат наружные более холодные слои оболочки. Но роль изменения температуры в характере изменения блеска новой звезды второстепенна по сравнению с изменением размеров поверхности излучающей оболочки.

Если бы процесс вспышки новой звезды ограничивался такой элементарной картиной, блеск ее после максимума падал бы очень быстро. Однако спектральные исследования и кривая блеска новой указывают на более сложный характер явлений, протекающих в оболочке уже после достижения ею максимального блеска.

По мере расширения оболочки новой звезды ее плотность уменьшается, линии поглощения становятся слабее и исчезают: сначала самые слабые, а после всех — самые сильные. Наступает небулярная стадия. Но это происходит не сразу после достижения максимума блеска. Вскоре после максимума блеска в спектре новой появляются кроме линий поглощения главного спектра, принадлежащих главной оболочке звезды, еще линии поглощения диффузно-искрового, а впоследствии и орионова спектра. Линии диффузно-искрового спектра сильнее смещены в фиолетовую область, что свидетельствует о том, что слои вещества, образующего линии диффузно-искрового спектра, удаляются от звезды со скоростью в полтора—два с половиной раза более высокой, чем скорость главной расширяющейся оболочки новой звезды. Скорость расширения вещества, образующего орионов спектр, бывает еще более высокая.

Спектральные линии диффузно-искрового и орионова спектров свидетельствуют о том, что в новой звезде и после достижения ею максимума блеска продолжается истечение вещества в расширяющуюся оболочку. Причина этого явления пока не установлена, но к началу небулярного периода масса выброшенной оболочки оказывается уже примерно в два раза больше, чем она была до появления диффузно-искрового спектра. Предполагают, что вещество, пополняющее оболочку после максимума блеска, разгоняется до более высоких скоростей энергией ионов и горячего ультрафиолетового излучения новой звезды. Такую гипотезу предложил советский астрофизик Э. Р. Мустель.

Газ пополняет оболочку отдельными сгустками разной скорости, плотности и температуры. Поэтому диффузно-

искровой и ортонов спектры новых звезд довольно разнообразны и переменчивы. Имея повышенную по сравнению с главной оболочкой скорость, они в конце концов догоняют главную оболочку и в момент, когда это должно произойти, в спектре новой звезды действительно исчезают линии диффузно-искрового спектра.

В тех случаях, когда истечение вещества из недр новой продолжается до самой небулярной стадии, оно может идти спокойно или, наоборот, неравномерно. В соответствии с этим кривая блеска в переходной стадии имеет различный вид. При спокойном истечении у кривой блеска плавный вид, а при неравномерном и кривая блеска, и интенсивности спектра и его ярких линий — все становится скачкообразным. Если же истечение газа вообще прекращается, то происходит резкое падение блеска. Затем в небулярной стадии блеск снова восстанавливается на уровне 6—7-й звездных величин ниже максимума.

Таким образом, колебания блеска, интенсивностей спектра и линий, а также их смещение, появление и исчезновение имеют естественное объяснение. Но существуют еще не решенные важные вопросы. Например, до сих пор не решен окончательно вопрос, когда происходит отделение главной оболочки от звезды. По представлениям части астрономов, это происходит сразу после взрыва и задолго до максимума. По мнению же Э. Р. Мустеля, вплоть до максимума происходит «раздувание» фотосферы новой звезды, а в момент максимума оболочка наконец отрывается.

И та и другая гипотезы объясняют все перипетии развития оболочки новой звезды и переход оболочки в газовую туманность. Одной гипотезе легче объяснить одни стадии, другой — иные. Однако для того чтобы раздувшаяся звезда стала сжиматься, она должна либо иметь огромную массу (в несколько сотен масс Солнца), либо сильные магнитные поля.

В последние годы специальные исследования снимков расширяющихся оболочек ярких новых звезд позволили Э. Р. Мустелю и А. А. Боярчуку выявить, что оболочка у Новой Персея 1901 г. имеет сравнительно правильную круглую форму (см. рис. 12), а у Новой Орла 1918 г. и Новой Геркулеса 1934 г. обнаружился своего рода симметричные по отношению к некоторой оси сгустки. Оболочки имеют полярные сгустки и экваториальные кольца

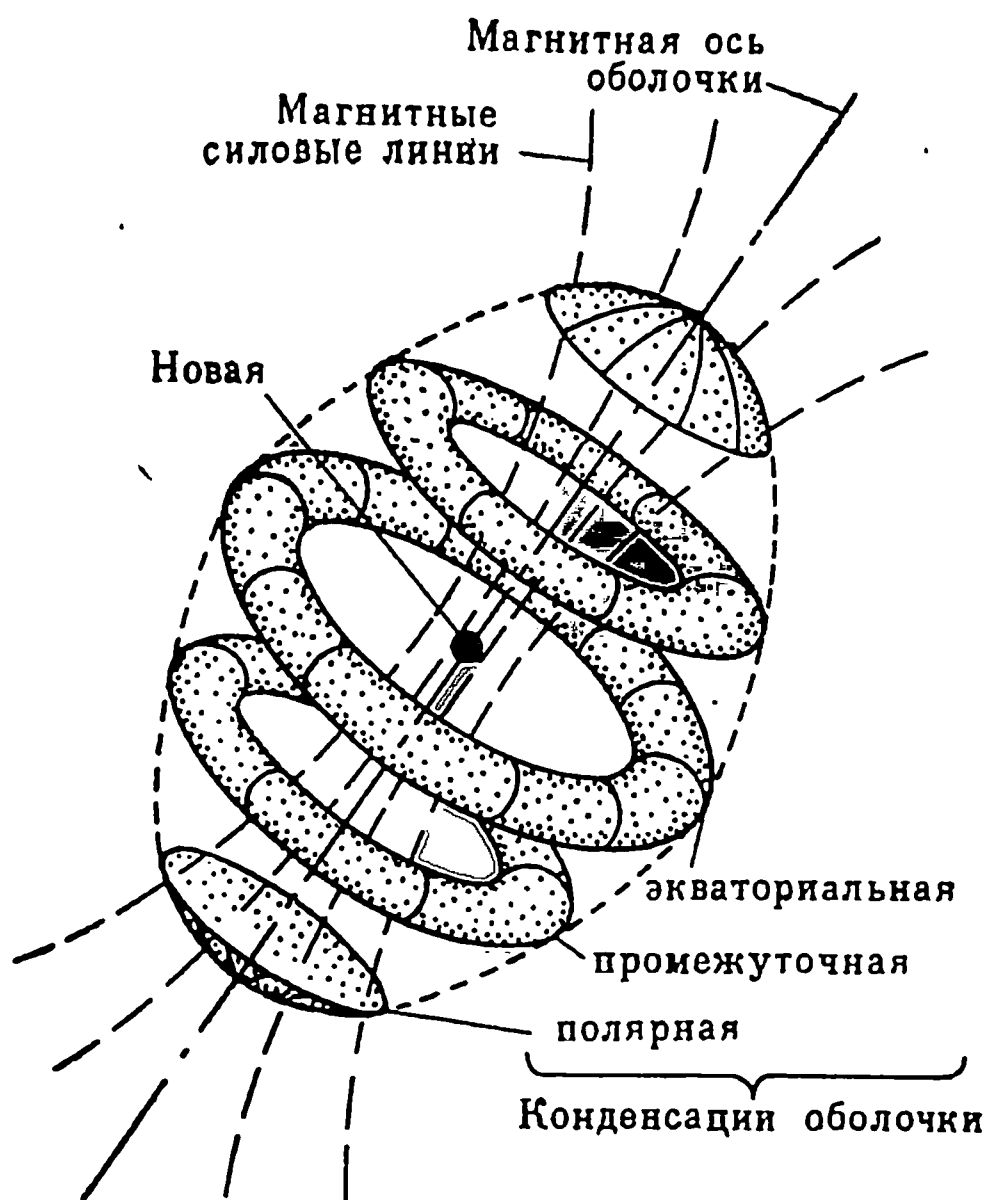


Рис. 19. Строеие газовой оболочки, выбро-
шенной Новой Орла 1918 г. по Э. Р. Мустелю

(рис. 19). По мнению авторов, такое явление может объясняться существованием магнитного поля новой звезды, имеющего осевой (дипольный) характер подобно магнитному полю земного шара. В направлении магнитной оси поле должно тормозить ионизованный газ в меньшей степени, чем в экваториальном направлении, поэтому расширяющаяся оболочка новой звезды приобретает вытянутую вдоль магнитной оси фигуру. Возможно также, что существует какая-то взаимосвязь между периодом обращения тесной пары в новой звезде и силой ее магнитного поля. Так, период обращения у Новой Персея примерно в 10 раз больше, чем у двух упомянутых выше новых, и воздействие магнитного поля на расширяющуюся оболочку в этом случае значительно выравнено по всем направлениям.

Установление следов магнитного поля в новых звездах и признание постоянного пополнения оболочки новой звезды после ее выброса уменьшили бы различие между упоминавшимися выше гипотезами.

После того как выяснилось, что новые звезды являются двойными системами с газовым кольцом, предстоит еще учесть роль красного спутника и газового кольца в развитии вспышки новой.

Полная энергия вспышки новой звезды

Чтобы приблизиться к раскрытию тайны взрывов в звездах, нужно оценить выделяющуюся при этом энергию. Совершенно очевидно, что если энергия взрыва составляет ничтожную долю запаса, заключенного в звезде, то взрыв не ведет к серьезной перестройке недр звезды, какая происходит, например, при переходе звезды на новый вид ядерного горючего. Кроме того, величина выделяемой при взрыве энергии подскажет, что может служить ее источником и где искать причину взрыва.

Но как установить величину энергии взрыва? Очевидно, по ее расходу на физические и механические процессы, протекающие во время вспышки. Воспользовавшись одним бухгалтерским термином «расход», мы тут же прибегнем к другому — «баланс», так как наша задача подвести энергетический баланс вспышки новой звезды. Каковы же основные статьи расхода звезды на устройство вынужденного фейерверка?

Как мы уже знаем, высокая температура в месте взрыва создает высокое давление, которое отрывает от звезды слой, лежащий над местом взрыва. Таким образом, часть энергии при взрыве расходуется в тепловой форме, а часть превращается в механическую энергию и используется на отрыв оболочки от звезды, на расширение газа в этой оболочке, а также на расширение самой оболочки. В условиях расширяющейся оболочки тепловая энергия взрыва вместе с энергией, поступающей из обнажившихся недр звезды, идет на излучение.

Преодоление тяготения звезды требует значительной энергии. Это, собственно, энергия, необходимая газовой частице или телу (например, ракете) для достижения второй космической скорости. Оторвавшись от звезды газ движется со скоростью около 1000 км/сек. Энергия этого движения — хорошо известная в механике кинетическая энергия — пропорциональна квадрату скорости расширения оболочки. По мере расширения оболочки увеличива-

ется излучающая поверхность звезды и соответственно растет световая отдача или светимость.

Чтобы подсчитать полный расход энергии, излучаемой за время вспышки, нужно сложить ее ежесуточные расходы, пользуясь сведениями об изменении блеска, температуры и размеров новой звезды. Расчеты показывают, что потеря новой звездой энергии на излучение оказывается почти такой же, как и расход энергии на отрыв оболочки.

Таким образом, рассматривая главные статьи расхода энергии новой звезды при вспышке, приходим к выводу, что одна половина энергии расходуется на механическую работу (отрыв и расширение оболочки), другая — на излучение.

Но все ли главные расходы мы учли? Не расходуется ли часть энергии новой звезды на образование космических лучей? Астрофизика установила взаимосвязь между рождением космических лучей и синхротронным радиоизлучением. Если в новой звезде рождаются космические лучи (не только протоны и другие ядра, но и электроны), они должны в свою очередь создавать в ее газовой оболочке сильное синхротронное и радиоизлучение. Но у новых звезд ни во время вспышки, ни в небулярной стадии, особенно благоприятной для этого вида радиоизлучения, не найдено его следов. Только в последние годы с помощью сильнейших радиотелескопов удалось обнаружить небольшое тепловое радиоизлучение некоторых новых во время их вспышек.

Зато исследования инфракрасных спектров новых звезд принесли сюрпризы. Если Новая Змеи 1970 г. после достижения максимума начала систематически ослабевать в видимых лучах, то на волнах 1—10 мк она более 3,5 месяца оставалась постоянной по блеску. Ее блеск в инфракрасной области достигал в этот период — 4-й звездной величины и она была самой яркой инфракрасной звездой на небе. И это происходило в то время, как звезда уже упала в визуальном блеске на четыре звездных величины после максимума. Предполагают, что высокую инфракрасную светимость новой звезды создает облако пылинок, сформировавшееся через несколько суток после начала вспышки. Температуру пылинок облака оценивают в 900°K , диаметр облака около 6,5 млрд. км, масса его — одна миллионная массы Солнца, или около 1% массы

оболочки, выбрасываемой новой звездой. Инфракрасный феномен был обнаружен также у повторной Новой Змееносца, имевшей последнюю вспышку за три года до проведенных наблюдений, но у повторной Новой Северной Короны повышенной инфракрасной светимости не нашли, потому что прошло уже 24 года со времени последней вспышки этой звезды.

В 1966 г. было обнаружено, что один из самых сильных источников рентгеновского излучения, находящийся в созвездии Скорпиона, по своему положению точно совпадает со странной звездой, которая по оптическим свойствам выглядит аналогичной новым в спокойной стадии. На протяжении 70 лет более или менее систематических наблюдений за новыми звездами астрономы не наблюдали вспышек этой звезды. Могли, конечно, и прозевать, но возможно, что вспышка случилась значительно раньше. Сейчас обнаружено еще несколько звезд, возможно, являющихся источниками рентгеновского излучения и похожих по спектру на бывшие новые. Но у обычных новых звезд ни во время вспышки, ни после нее рентгеновское излучение никогда не находили.

По всей видимости, звезды с рентгеновским излучением и новые звезды — разные по природе объекты, а спектральное сходство — второстепенный общий признак этих глубоко различных объектов. Для возникновения рентгеновского излучения в газе должна быть температура в 50 млн. градусов. Такой нет и в центре Солнца. Не найдено ее и в оболочке новых. Наблюдаемое слабое по мощности рентгеновское излучение Солнца связано со взрывами в нем и несравнимо с мощностью рентгеновского излучения в Скорпионе или у других объектов, таких, как близкие к нашей радиогалактики в Деве и Центавре, а также остатки галактических сверхновых. И те и другие имеют кроме рентгеновского еще и сильное нетепловое радиоизлучение, вырабатывают космические лучи и вообще обладают совершенно иным энергетическим бюджетом. Это — совершенно «не подходящая компания» для новых звезд с их сравнительно скромными энергетическими расходами.

В зависимости от светимости при вспышке (т. е. от абсолютной величины звезды в максимуме блеска) расходы энергии на расширение, отрыв и излучение новой колеблются в десятки раз. Но самое существенное разли-

чие в энергетическом балансе новой зависит от того, когда отрывается ее оболочка: при взрыве или после раздувания звезды до максимума. В последнем случае расходы в 200 раз ниже, но, как говорилось при разборе этих гипотез, у новой звезды должны быть либо огромная масса, либо сильное магнитное поле. Во избежание этих трудностей предпочитают гипотезу раннего отрыва, ведущую к упомянутому равенству механической и излучательной долей энергии взрыва.

За время между вспышками новая звезда излучает примерно столько же энергии, сколько высвобождает при вспышке. Следовательно, не становясь на грань энергетического банкротства, она может позволять себе повторять такие фейерверки через определенное время. Ранее мы видели, что и выбрасываемая при взрыве масса газа не существенна для ее дальнейшей судьбы.

В связи со своеобразием природы новых и им подобных интересно выяснить их место на диаграмме Герцшпрунга—Рессела. Как установил Б. А. Воронцов-Вельяминов, эти объекты занимают вертикальную полосу в области бело-голубых звезд со светимостью ниже горячих звезд главной последовательности (рис. 20).

Эта полоса получила название «бело-голубой последовательности». Кроме новых звезд, новоподобных и типа U Близнецов, в эту последовательность входят ядра планетарных туманностей, звезды Вольфа—Райе и другие объекты.

В 1946 г. Б. А. Воронцов-Вельяминов в соответствии с принятыми тогда представлениями об эволюции всех звезд с выбросом (потерей) массы полагал, что эта последовательность — своего рода лифт, по которому горячие звезды, теряя массу непрерывным истечением газа или взрывами, спускаются с главной последовательности в подвал, заселенный бессмертными гномами — белыми карликами.

Сейчас известно, что большинство звезд эволюционирует, не теряя массу, но именно бело-голубые звезды представляют собой важное исключение: непрерывное истечение вещества с поверхности звезд Вольфа—Райе, взрывы в новых и других взрывных звездах и явление планетарных туманностей — это наблюдаемые факты, которые говорят, что в жизни таких объектов потеря массы играет эволюционную роль.

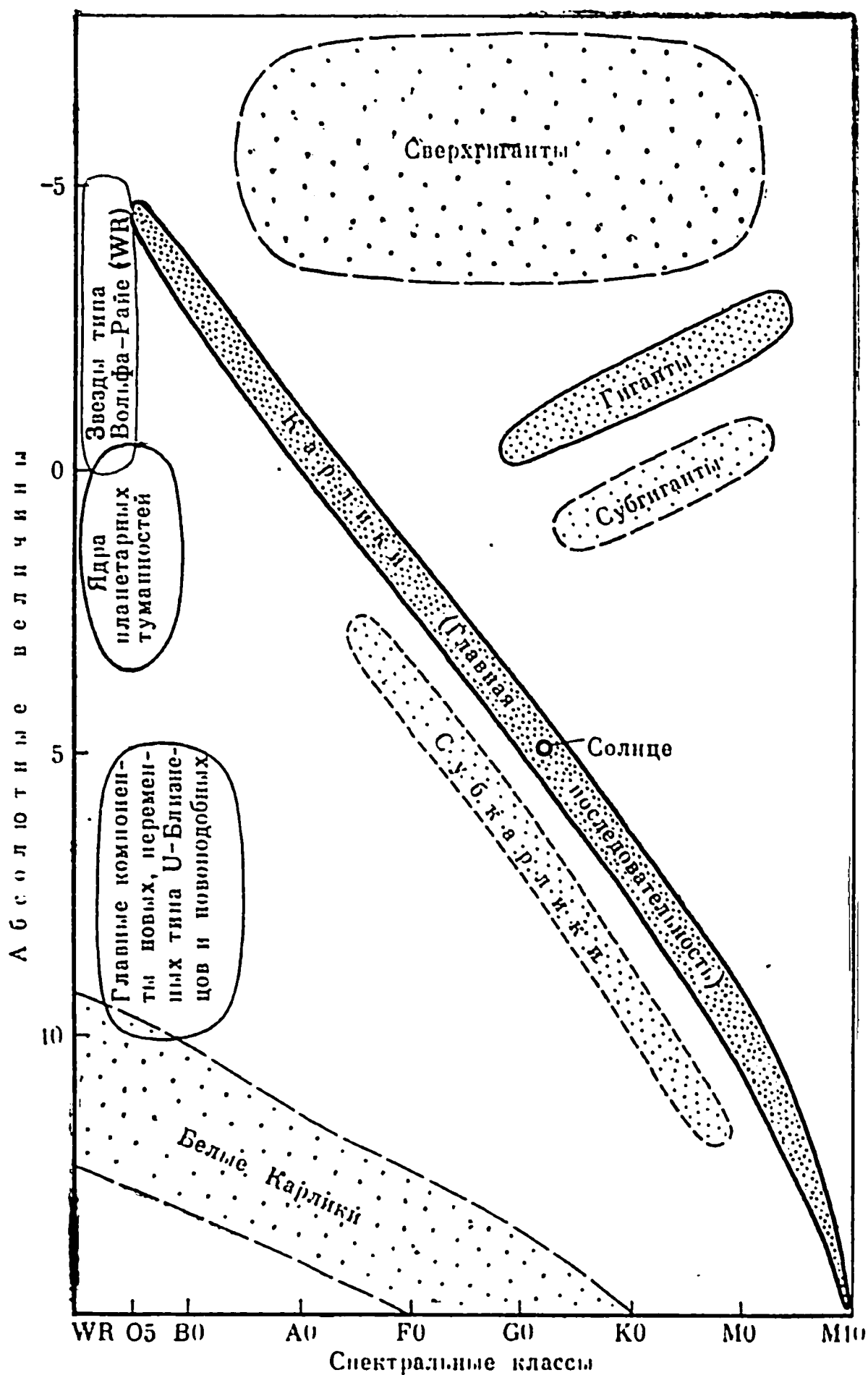


Рис. 20. Области, занимаемые на диаграмме Герцшпрунга — Рессела новыми, новоподобными и переменными звездами типа U Близнецов

Переходят ли одни объекты в другие или просто сосуществуют в сходных по условиям состояниях, это решат исследования роли двойственности взрывных звезд в их эволюции.

В этом отношении показательна гипотеза американца Р. Крафта и аргентинца Х. Сахаде о том, что звезды типа U Близнецов есть этап в ходе эволюции затменно-

переменных систем, имеющих периоды менее суток (так называемых систем типа W Большой Медведицы). Действительно, тесные двойные с периодами менее суток сходны со звездами типа U Близнецов по размещению в Галактике и по характеру движения в ней. А по светимости, массам и периодам обращения первые несколько больше вторых. Поэтому вследствие эволюции звезды типа W Большой Медведицы должны терять половину своей массы. В процессе эволюции одна из звезд двойной системы должна стать красным гигантом, который заполняет своей атмосферой пространство вплоть до точек равновесия. Через эти точки уходит часть его газа, т. е. теряется масса звезды. Ход эволюции тесной двойной системы с этого момента изменяется: она быстро теряет в массе и превращается в переменную типа U Близнецов. Как мы увидим далее, что-то в таком же роде происходит, по-видимому, и у новых звезд.

Что известно о причинах взрыва в новых звездах?

Чем больше мы узнаем о новых звездах, тем ближе подходим к выяснению причин взрывов в них, но тем строже и требовательнее становимся к гипотезам, которые пытаются объяснить, почему происходят вспышки новых звезд. Первые гипотезы были высказаны еще в XVI в. Тихо Браге; самые новые гипотезы возникли уже в наше время. Но, к сожалению, это по-прежнему только гипотезы, предположения, а настоящей теории, которая объясняла бы причины взрывов в новых звездах, опираясь на которую, можно было бы рассчитывать мощность и длительность вспышек, периодичность их и место в звезде, где произошел взрыв, до сих пор нет.

Причина взрыва в новой может быть либо внешняя, либо внутренняя. Раньше, когда о новых звездах было известно мало, астрономы охотно принимали гипотезы о внешних причинах вспышек новых. Например, полагали, что это столкновения звезд, падение на звезды комет, планет, пыли и т. д. В начале нашего века, когда только складывались основы теории внутреннего строения звезд, получила распространение гипотеза, согласно которой звезда после израсходования горючего начинает быстро сжиматься (коллапсировать); при этом выделяется

много энергии в виде взрыва, часть массы выбрасывается и звезда превращается в белый карлик. Эта гипотеза объясняла вспышки новых уже внутризвездными причинами.

Ни одна из гипотез, исходящих из внешних причин вспышек новых, не согласуется с известными теперь данными об этих звездах. Столкновения звезд должны случаться значительно реже, чем вспышки новых. Что касается выпадения пыли и тел на звезды, то в этом случае мы наблюдали бы огромное разнообразие во вспышках. Ведь такие события могли бы происходить и с карликами и с гигантами разных спектральных классов, а между тем по типу новых вспыхивают только звезды определенного класса.

Совершенно не согласуется с частотой вспышек новых и гипотеза превращения обычной звезды в белый карлик. В этом случае звезда должна была бы при вспышке избавиться от значительной массы, а между тем массы оболочек новых звезд составляют всего лишь тысячные и десятитысячные доли масс самих звезд. А главное, по современным представлениям, в Галактике около двух триллионов звезд, половина которых, по-видимому, белые карлики. Ежегодно же вспыхивает около 260 новых звезд. Сколько же лет понадобилось бы для того, чтобы образовались все белые карлики, пройдя через стадию новых звезд? Оказывается, в сорок раз больше, чем возраст промежуточной подсистемы Галактики, к которой принадлежат новые звезды. А кроме того, обнаружено, что красные гиганты сами по себе систематически теряют массу газа через оболочку, поэтому они могут перейти в белые карлики без пребывания в стадии взрывной звезды.

В середине нашего века стало ясно, что причиной вспышки новой звезды может быть взрыв термоядерного характера в ее центре или, скорее всего, на периферии, около поверхности звезды. Эту гипотезу подробно разработали советские астрофизики А. И. Лебединский и Л. Э. Гуревич. Выяснилось, в частности, что независимо от того, где произошел взрыв, результат получается одинаковый: возникает ударная волна, которая срывает внешние слои звезды, и они начинают расширяться. О том, что такое ударные волны, мы будем говорить в главе X. Здесь же отметим, что гипотеза ударной волны пока не может объяснить, почему из звезды и после

вспышки долгое время продолжается истечение газа в расширяющуюся оболочку.

Совершенно иной подход к объяснению взрыва появился теперь, когда стала очевидной двойственность новых звезд. Чтобы звезда стала новой, необходимо, чтобы она была тесной двойной системой. Но что же в таком случае вызывает вспышки? Французский астрофизик Э. Шацман предложил гипотезу взрыва на поверхности белого субкарлика или карлика при совпадении одного из периодов колебания в его поверхностном слое с периодом обращения звезд в двойной системе. Но эта гипотеза тоже не оправдалась.

В настоящее время предполагают, что голубая звезда тесной двойной системы вызывает в красной звезде приливы, в результате которых через точку равновесия из красного гиганта извергается газ. Образующееся в результате газовое кольцо вокруг голубой звезды ею поглощается. Если же голубая звезда является белым карликом, то газ, главным образом водород, будет сгорать в поверхностном слое белого карлика, так как этот слой является областью, где могут идти ядерные реакции. Но в белом карлике возрастание выделения энергии не приводит к увеличению давления, а только повышает температуру. Вот это и вызывает взрыв, так как при повышении температуры ядерное сгорание водорода приобретает взрывной характер.

Гипотезы о причинах вспышек новых звезд пока еще носят чисто схематический характер и только начинают разрабатываться всерьез. Предстоят многочисленные расчеты, уточнения и, может быть, важные изменения в деталях гипотез. Появятся, возможно, и другие гипотезы. Одно для астрономов стало несомненно: наше Солнце не принадлежит и не будет принадлежать к классу звезд, из которых образуются новые. Это стало ясно еще лет тридцать назад, как только было установлено, что превращение звезд в белые карлики не происходит через стадию новой звезды.

СВЕРХНОВЫЕ В ДАЛЕКИХ ГАЛАКТИКАХ

Самые яркие вспышки звезд

Человечество почти пять тысячелетий хранит в памяти многочисленные яркие вспышки звезд. Их сейчас насчитывают около двухсот, если ограничиваться превышающими по блеску 3-ю звездную величину. Самые яркие и долго наблюдавшиеся из них и были, как оказалось, сверхновыми — так называется самый яркий по светимости и редкий класс взрывных звезд.

Но до начала нашего столетия астрономы не различали новые и сверхновые звезды. На существование звезд, в десятки и сотни тысяч раз превышающих светимости новых звезд, впервые указал шведский астроном К. Лундмарк в 1919 г. Его заключение было основано на изучении природы спиральных туманностей, в некоторых из них к тому времени наблюдались вспышки звезд.

В 1885 г. астроном обсерватории Дерптского (теперь — Тартуского) университета О. Хартвиг обнаружил возле центра большой туманности Андромеды новую звезду, которая в максимуме блеска достигла 5-й величины. По блеску в этот момент она намного превосходила яркость окружающей ее туманности, хотя, если собрать блеск всей туманности, занимающей на небе эллипс размерами $3^\circ \times 2^\circ$, в точку, то блеск последней был бы на одну звездную величину выше новой звезды 1885 г. Эту звезду наблюдали в телескопы во многих странах, был даже получен один фотоснимок туманности вместе с новой звездой. К сожалению, он сейчас утерян.

В то время природа спиральных туманностей, к которым относится туманность Андромеды, еще не была разгадана. С середины прошлого века конкурировали две гипотезы. Одна, ведущая начало от создателя звездной астрономии В. Гершеля, считала спиральные туманности

звездными системами, «островными вселенными», как выражался немецкий исследователь А. Гумбольдт. Другая предполагала, что все туманности являются газовыми. Некоторые астрономы считали, что спиральные туманности — это молодые звезды, окруженные газовыми рукавами, в которых зарождаются планеты. Спор о природе спиральных туманностей продолжался до конца первой четверти нашего столетия, пока гипотеза о газовой природе спиральных туманностей не была отвергнута наблюдениями с большими телескопами.

Уже с телескопом диаметром 1,5 м в туманности Андромеды стали открывать новые звезды, которые имели обычно 16-ю звездную величину в максимуме, а К. Лундмарк на фотографиях, полученных с этим телескопом, установил, что спиральные ветви туманности Андромеды и туманности Треугольника содержат множество слабых, находящихся на грани различения звезд. Только в 1925 г., когда вступил в строй телескоп с диаметром зеркала 2,5 м, американский астроном Э. Хаббл полностью подтвердил догадку Лундмарка. Их открытие, как мы уже ранее говорили, положило начало внегалактической астрономии.

Но если туманность Андромеды — большая звездная система, то новая звезда, имевшая в максимуме почти такую же светимость, как сама туманность, должна быть колоссальна по мощности, заключил в 1919 г. Лундмарк. К тому времени такие вспышки были известны уже в десяти спиральных и одной неправильной туманности, а советский астроном И. А. Балановский в 1922 г. сообщил, что в 1919 г. наблюдал такую вспышку в эллиптической туманности, известной сейчас как Дева-А (NGC 4486).

Оказывалось, что мощные вспышки — не случайность, а распространенное явление. Такие мощные вспышки были, очевидно, и в нашей Галактике и наблюдались в древности. Лундмарк обратился к спискам вспышек новых звезд, наблюдавшихся со II в. до н. э. китайцами, европейцами и арабами. Такие списки составляли А. Гумбольдт и Ж.-Б. Био в XIX в. и Е. Циннер в 1919 г. Но Лундмарк пошел дальше, он указал, где было возможно, сколько времени наблюдалась та или иная вспышка, как она была ярка и насколько достоверны сведения о ней. Он убежденно настаивал, что среди от-

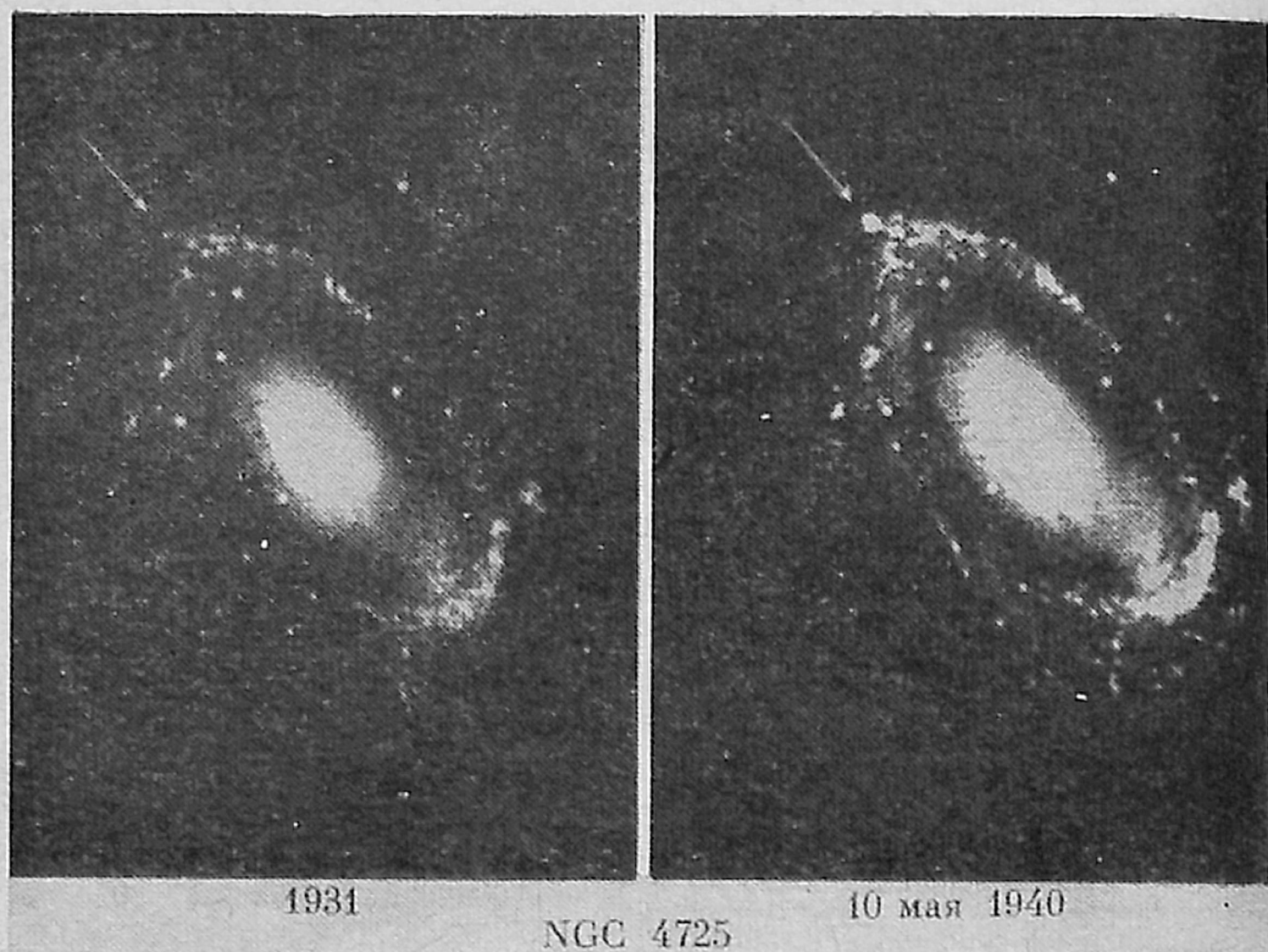


Рис. 21. Галактика NGC 4725 за 9 лет до вспышки (слева) и во время вспышки сверхновой (справа)

меченных есть вспышки, аналогичные вспышке в туманности Андромеды. Но какие именно, установить тогда было еще очень трудно. Эту задачу решали долгое время и до конца еще не решили и сейчас.

С 1934 г. В. Бааде и Ф. Цвикки стали называть вспышки, подобные вспышке 1885 г. в Андромеде, сверхновыми звездами. Основные сведения о них дают систематические наблюдения за внегалактическими туманностями (галактиками). В настоящее время число внегалактических сверхновых (рис. 21), наблюдаемых с 1885 г., превысило 350. Но что происходит со сверхновой дальше, когда она ослабевает настолько, что исчезнет из поля зрения сильнейшего телескопа, стало известно только тогда, когда в нашей Галактике, в сравнительно близком соседстве от Солнца были обнаружены остатки сверхновых.

К сожалению, вспышки сверхновых чрезвычайно редки. Между тем одна такая вспышка в нашем или соседнем спиральных рукавах Галактики дала бы столь богатый и

полный материал о явлении, что все предшествующие наблюдения и исследования сверхновых отодвинулись бы на второй план. Последний раз сверхновая по соседству с нами наблюдалась еще до начала телескопической эпохи, в 1604 г. Кеплером и другими, а еще одну галактическую сверхновую, имевшую максимум блеска где-то около 1667 г. (уже в эпоху телескопов!), астрономы не смогли заметить, хотя она вспыхнула в созвездии Кассиопеи, которое в нашем северном полушарии никогда не заходит за горизонт.

Между внегалактическими и галактическими сверхновыми в силу значительного различия эпох наблюдения вспышек сложилось, если можно так выразиться, разделение проблем. По внегалактическим сверхновым астрономы изучают оптическую картину вспышки, рассматривают их как один из замечательных типов взрывных переменных звезд. А по остаткам галактических сверхновых — их поздние стадии развития, когда они уже превратились в газовую туманность и нейтронную звезду.

Следуя этому естественному разграничению обязанностей, мы сначала познакомимся с оптическим аспектом явления — вспышкой по интересным представителям внегалактических сверхновых, а потом — с галактическими сверхновыми и их остатками, играющими важную роль в эволюции Галактики и ее межзвездной среды.

Современные наблюдения вспышек сверхновых

Сверхновыми мы называем явления вспышек звезд, намного превосходящие по мощности вспышки новых и отличающиеся от последних рядом особенностей: значительно более яркими абсолютными величинами в максимуме блеска, более значительным падением блеска после максимума, особым характером изменения блеска и спектра и длительным существованием радиоизлучающих газовых и звездных остатков.

Таким образом, это действительно особая разновидность взрывных звезд, и первоначально, до открытия остатков сверхновых, круг исследований был практически ограничен обычными для переменных звезд вопросами. Правда, уже в 1934 г. Бааде и Цвикки в поисках причин взрыва такого масштаба указывали на вероятность гра-

витационного коллапса и образования нейтронных звезд, предсказанных теоретически Л. Д. Ландау в 1932 г. Астрономов интересовали кривые блеска, амплитуды и абсолютные величины в максимуме блеска, спектральные характеристики и положение сверхновых в галактиках. С первых исследований, проводившихся Бааде, Цвикки и Минковским, стало очевидно, что сверхновые, с одной стороны, разнообразны по свойствам, а с другой — обнаруживают в ряде случаев удивительное сходство.

Систематическое изучение каждого нового загадочного явления обычно начинается с подробной классификации. Какой же признак — информация о блеске или информация о спектре сверхновой — проще и более пригоден для классификации? Казалось бы, первый. Ведь для оценок блеска звезд и составления по ним кривой блеска годятся обычные телескопы с фотометрическими приборами. Причем оценки блеска возможны практически до предельной звездной величины, которая улавливается используемым телескопом. Предельная же звездная величина для спектрографа, установленного на этом же телескопе, в самых лучших случаях на четыре звездных величины хуже и для получения спектров слабых звезд нужно прибегать к особым техническим ухищрениям.

К сожалению, сверхновые часто открываются поздно, уже в стадии угасания, или же после открытия наблюдения за ними прерываются надолго плохой погодой. В обоих случаях имеется единственный выход из положения: астрономы должны просматривать снятые снимки неба сразу же после почти наблюдений и сообщать об открытии как можно большему числу обсерваторий. В Советском Союзе с этой целью посылаются телеграммы в Москву, в Государственный астрономический институт имени Штернберга, в Бюро астрономических сообщений, а за рубежом — в международное бюро. Оба бюро срочно извещают друг друга, и обсерватории, где есть возможность наблюдения сверхновой, приступают к ним. Кроме того, просматриваются снимки того же участка неба, сделанные накануне открытия с целью обнаружения сверхновой в более раннее время. В случае совместных усилий в конце концов удастся получить известный участок кривой блеска сверхновой. Хорошие кривые получены в каких-нибудь десяти процентах открытых сверхновых. Видимо, они не могли стать средством мас-

совой классификации. Тем не менее это было бы единственным выходом, если бы не существовало важных различий в спектрах сверхновых. Последние оказались более эффективными и стали основой подразделения сверхновых на типы.

Изучая спектры сверхновых, Минковский показал, что их можно разделить на две группы и, более того, даже определить по спектру, сколько суток прошло после достижения сверхновой максимума блеска. Таким образом, получение одной-двух спектрограмм решало сразу две задачи: и классификационную и задачу определения даты максимума, а последнее очень важно при немногочисленных и отрывочных наблюдениях блеска сверхновой.

В чем же заключалась спектральная классификация сверхновых, установленная Минковским? Он обнаружил, что значительная часть сверхновых имеет очень сходные спектры, отличающиеся широкими полосами и отсутствием ярких линий водорода. Их он отнес к I типу. А ко II типу отнесены сверхновые, в спектрах которых отмечались яркие линии водорода, но в отличие от новых не было запрещенных линий. Минковский упоминал еще о «третьем типе» — нескольких слабых сверхновых, скорее относящихся к ярким новым; в основном его классификация была, можно сказать, «двоичной»: ее составляли «тип первый» и «тип непервый». Казалось бы, сильное упрощение, но двоичная операция весьма универсальна, она в отличие от других не имеет исключений. На ее принципе, как известно, работают логические системы.

Когда обратились к кривым блеска, то оказалось, что сверхновые I типа имеют удивительно сходные кривые блеска, а II типа — довольно разнообразны по кривым блеска. На рис. 22 приводятся кривые блеска сверхновых I и II типов. По единичным наблюдениям сверхновых I типа установлен быстрый подъем до максимума блеска. Подъем, по-видимому, продолжается около 20 суток. Максимум длится всего несколько суток и сменяется быстрым падением блеска на три величины. Падение длится от 20 до 40 суток (этим сверхновые I типа немного различаются между собой). Затем падение блеска замедляется: на одну-две звездные величины за 100 суток. Сверхновая 1937с пока рекордна по длительности наблюдений (635 суток), но наблюдения за сверхновой 1972е, продолжающиеся еще и сейчас, будут еще более дли-

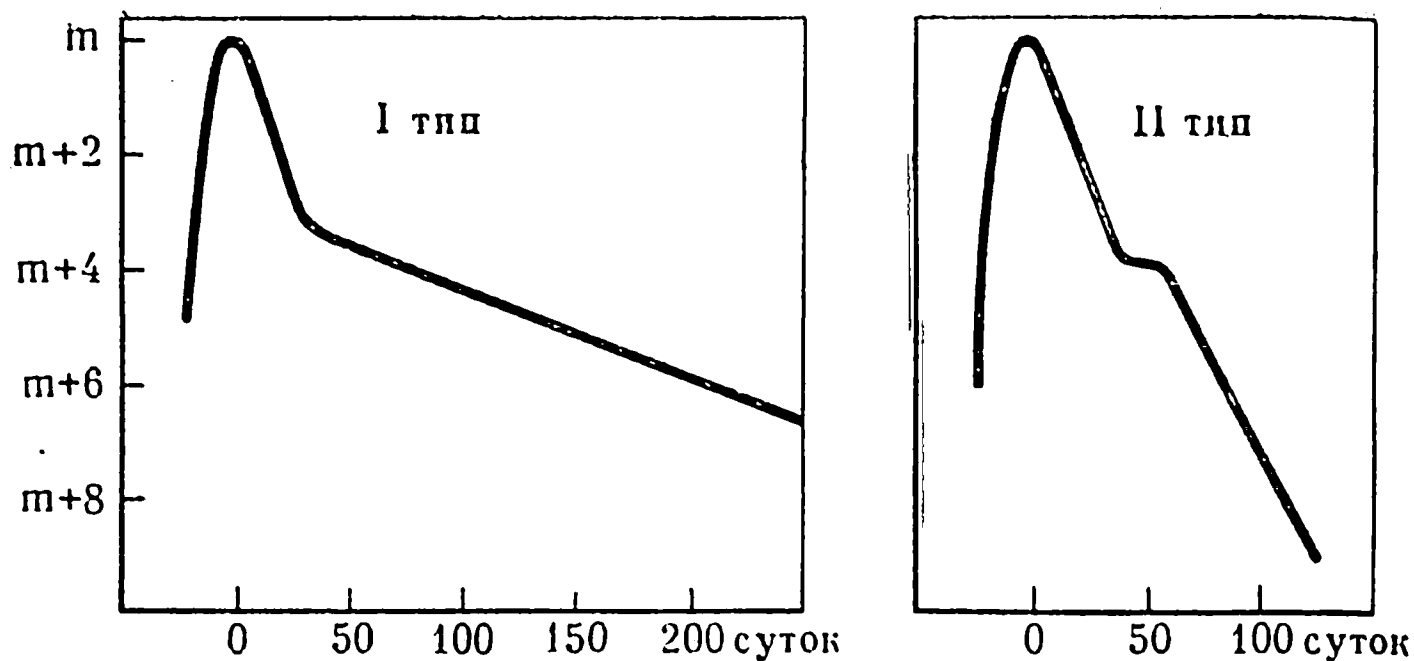


Рис. 22. Кривые блеска сверхновых I и II типов

По горизонтали отмечены сутки, по вертикали — звездные величины

тельны. До вспышки на месте сверхновой 1937с не было звезды ярче 20-й величины, а сейчас нет звезды ярче 24-й величины. Перепад между максимумом блеска сверхновой и блеском ее до вспышки фактически неизвестен, но он заведомо больше двенадцати звездных величин; перепад между максимумом блеска и блеском звезды после вспышки, как теперь установлено по сверхновым нашей Галактики, более 23 звездных величин.

Кривые блеска сверхновых II типа изучены меньше: примерно с 20 суток до максимума и до 270 суток после него (рис. 22). В максимуме блеска сверхновые II типа могут задерживаться дольше, чем сверхновые I типа. Главная же особенность кривых блеска сверхновых

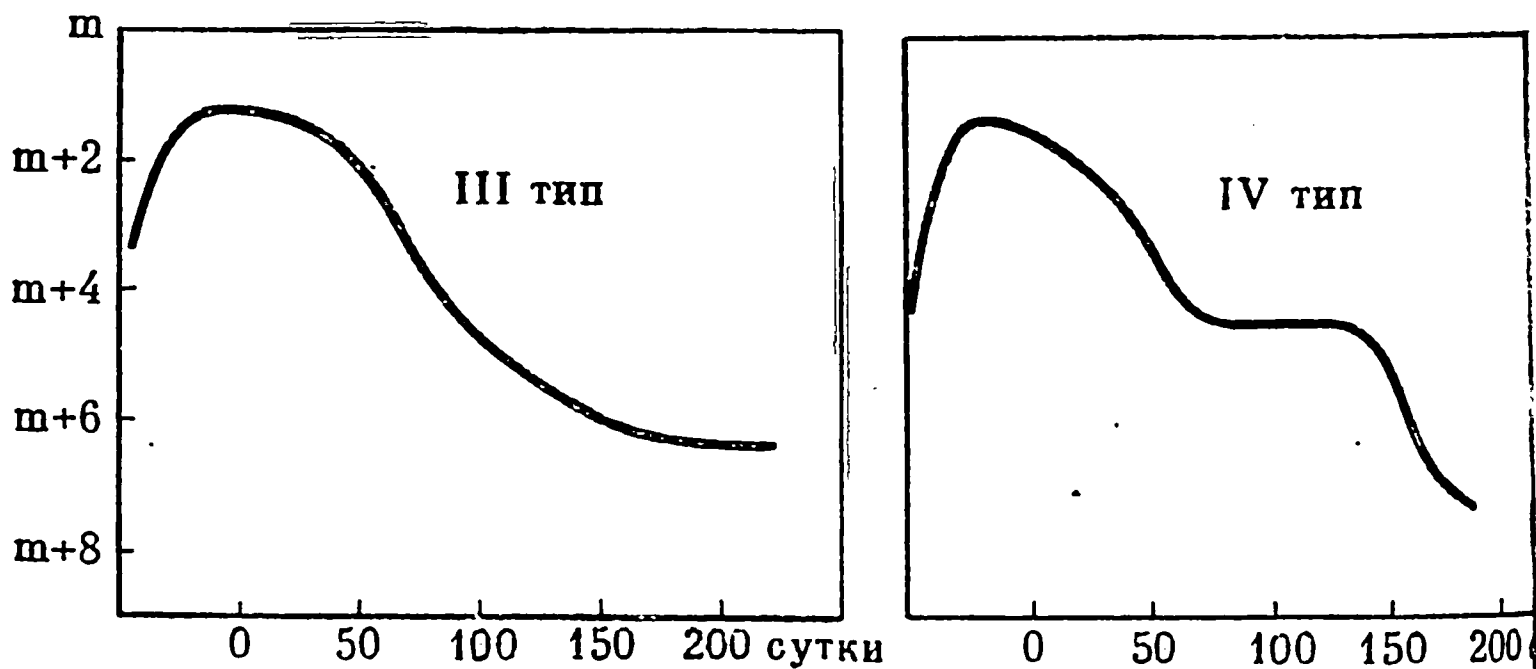


Рис. 23. Кривые блеска сверхновых III, IV и V типов

II типа — большая индивидуальность, которая обнаруживается, в частности, и в скорости ослабления блеска — в среднем на одну звездную величину за 12—50 суток.

В 1961 г. Цвикки указал еще на три типа редких сверхновых, спектрально отличающихся от первых двух. Пока исследованы только найденные им образцы или, как говорят, «прототипы». По кривым блеска эти сверхновые также своеобразны. Сам Цвикки считает, впрочем, что сверхновая III типа представляет собой мощную и поэтому редкую разновидность сверхновой II типа. К такому же заключению приходят Д. Бренч (Англия), Дж. Гринстейн (США) и ряд других исследователей. Зато сверхновая IV типа уникальна во всех отношениях. Наконец, сверхновая V типа замечательна медленным развитием вспышки. Оказалось, что на старых снимках она была видимой в спокойном состоянии еще в 1937 г.; открыли же ее в 1961 г., когда она поднялась в яркости и находилась на ступеньке кривой блеска перед подъемом к максимуму. Ею она достигла не спеша, через сто десять суток после открытия и затем стала медленно слабеть (рис. 23). За ее блеском до сих пор регулярно наблюдают в обсерватории Асьяго (Италия), где получено большинство оценок блеска этой сверхновой. Бренч и Гринстейн предполагают, что эта сверхновая представляет другую крайность сверхновых II типа — его слабый и замедленный вариант.

При изучении кривых блеска сверхновых особое внимание, естественно, уделяется установлению момента максимума блеска и соответствующей ему звездной ве-

личины. При отсутствии прямых наблюдений максимума это пытаются сделать путем восстановления кривой блеска по наблюдавшемуся ее участку или же по виду спектра звезды.

Для вычисления абсолютной величины сверхновой достаточно знать расстояние до галактики, где она вспыхнула, что можно установить обычными приемами, о которых уже было рассказано.

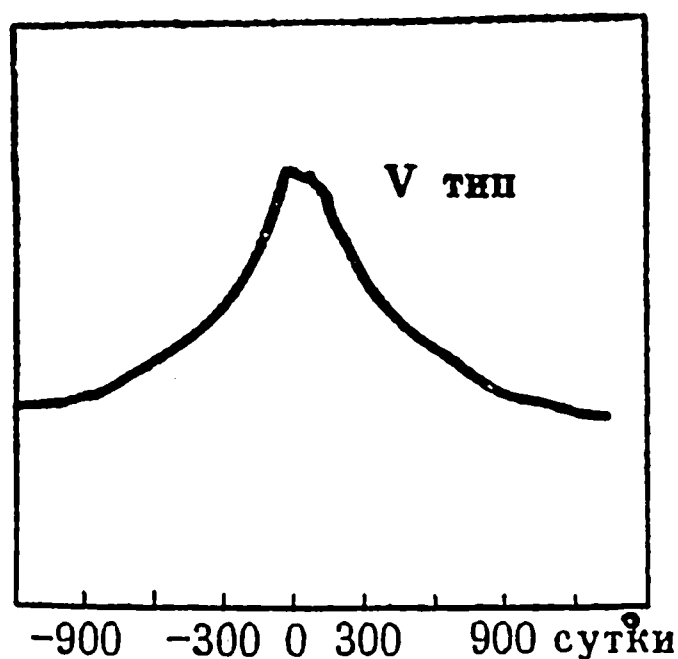


Таблица 13
 ЯРЧАЙШИЕ И НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЕ
 ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ СВЕРХНОВЫЕ

Сверхновая				Галактика, в которой она вспыхнула		
обозна- чение	тип	блеск в максимуме, <i>m</i>		обозначение	тип	видимая звездная величина, <i>m</i>
		видимая величина	абсолют- ная величина			
1885a	I	5	—19	NGC 224	Sb	4
1895b	I	7	—20	NGC 5253	I	11
1937c	I	8	—21	IC 4182	Sc	14
1954a	I	9	—21	NGC 4214	I	10
1962m	II	10	—18	NGC 1313	Sb	11
1920a	I	10	—19	NGC 2608	Sb	13
1921b	I	11	—20	NGC 3184	Sc	10
1961i	III	11	—20	NGC 4303	Sb	12
1961f	IV	13	—17	NGC 3003	Sb	12
1961v	V	11	—18	NGC 1058	Sb	12
1972e	I	7	—20	NGC 5253	I	11

В табл. 13 приведены сведения о нескольких самых ярких сверхновых I и II типов, их абсолютные величины в максимуме блеска, а также сведения о единственных пока известных представителях сверхновых III, IV и V типов. Как видно из таблицы, абсолютные величины сверхновых I и II типов в среднем различаются на две звездные величины. Но и те и другие в максимуме блеска в десятки тысяч раз превосходят по светимости обычные ярчайшие звезды и новые в период вспышки. Сверхновая же III типа в максимуме равна или даже превосходит по блеску свою галактику!

В каких местах галактик вспыхивают сверхновые

В конечном счете нас интересует природа сверхновых звезд, т. е. мы хотим знать, что за звезды взрываются как сверхновые, как происходит этот взрыв, как развивается после взрыва процесс свечения, во что, наконец, превращается взорвавшаяся звезда и какое значение имеет это явление для эволюции звездных систем.

Для выполнения такой программы нужно провести всестороннее исследование сверхновых. Для ответа на тот или иной вопрос в одних случаях нужны спектральные исследования, в других — изучение кривых блеска, светимости, а иногда теоретические исследования. Для изучения судьбы взорвавшихся звезд важным оказывается исследование их остатков в нашей Галактике. Программа исследования сверхновых еще далека от завершения. Кое-что установлено, но многое еще носит гипотетический характер. Предстоит долгая работа. Астрономы, в сущности, находятся только в самом начале исследования.

Одной из загадок пока остается тип звезд, которые взрываются. Позже мы познакомимся с рядом фактов, которые, по-видимому, говорят о вероятных кандидатах в сверхновые, но пока это лишь предположения. Важно иметь больше наблюдательных данных. Многое может проясниться, когда мы узнаем, где и как часто вспыхивают сверхновые. В зависимости от этого под подозрением окажутся те или иные категории звезд, а остальные будут исключены из рассмотрения. Постепенно сужая круг возможных объектов, можно прийти к тем звездам, которые являются «предсверхновыми».

В каких же местах галактик чаще наблюдались вспышки сверхновых, что они больше предпочитают: рукава или области вне их, центральную часть галактики или ее периферию? Впервые это было исследовано в 1944 г. П. Г. Куликовским. Он установил, что сверхновые в спиральных системах предпочитают появляться в рукавах и, по-видимому, избегают центральных областей галактик. Впрочем, это, возможно, объясняется тем, что на снимках ядра галактик обычно выходят передержанными и около трети сверхновых по этой причине не обнаруживается, хотя на периферической области они были бы легко обнаружены. Когда сверхновая достигла максимума, она хорошо выделяется и в центральной области галактики, но это бывает намного реже.

Много мог бы дать геометрический анализ размещения сверхновых в спиральных и эллиптических галактиках, но для его осуществления имеются две трудности. Прежде всего, видя сверхновую на изображении галактики, мы можем судить только о ее расположении относительно центра галактики. Установить же, насколько тесно к ее

главной плоскости в действительности находится сверхновая, нельзя. Помочь этому могли бы стереоскопические снимки сверхновой на фоне галактики, сделанные на Земле и в какой-нибудь галактике, удаленной от нашей на несколько Мегаларсек. Впрочем, если собрать данные о видимом размещении нескольких сверхновых, то представление о их расположении в галактике уже можно получить тем или иным путем. Но здесь появляется новая трудность: вспышки сверхновых чрезвычайно редки. Почти за 90 лет наблюдений вспышки сверхновых были отмечены примерно в одной галактике из пятидесяти ей подобных по видимой звездной величине. Правда, в 15 случаях наблюдались и по 2—4 вспышки в одной галактике, но этого мало для статистических подсчетов. Приходится собирать данные о расположении сверхновых в отдельных галактиках одного и того же типа и по ним строить синтетическую картину.

Статистический по форме и геометрический по существу анализ проведен американским исследователем Х. Джонсоном и канадцем Дж. Мак-Леодом, а затем и нашим молодым астрономом А. В. Мироновым. Они прикинули, как должна выглядеть картина размещения сверхновых на изображении «синтетической» спиральной галактики, если они располагаются тесно к галактической плоскости, и как, — если сверхновые образуют сферический рой вокруг галактики. Оказалось, что первый вариант ближе к действительности.

Здесь нужно отметить, что сверхновые I и II типов ведут себя различно по отношению к галактикам разных классов. Если сверхновые I типа встречаются и в спиральных, и эллиптических, и неправильных галактиках (в одних чаще, в других реже), то сверхновые II типа вспыхивают только в спиральных галактиках типов Sb и Sc. Сверхновые III, IV и V типов наблюдались только в галактиках типа Sc. Чем же вызвана такая «разборчивость» сверхновых?

Дело, по-видимому, в том, что сверхновые I и II типов относятся к разным подсистемам звездного населения. Спиральные галактики, как мы знаем, имеют богатое звездное население плоской подсистемы (горячие звезды и газ), образующее спиральные рукава, а эллиптические галактики этой системой не обладают. Поэтому сверхновые II типа, безусловно, являются представи-

телями плоской подсистемы звезд. Зато сферическая подсистема звезд встречается и в спиральных и в эллиптических галактиках. Поэтому первоначально думали, что сверхновые I типа относятся к этой подсистеме. Но, как теперь убедились, это противоречит тенденции всех сверхновых размещаться близко к галактическим плоскостям и выводу о многочисленности вспышек сверхновых в галактиках типа Sc, где население сферической подсистемы незначительно.

Выход из положения нашли голландские астрономы Ян Оорт и П. Катгерт, которые решили, что сверхновые I типа принадлежат одной из промежуточных подсистем, но, к какой из двух, — не установили.

Автор данной книги использовал новый способ оценки размещения сверхновых I и II типов по видимому характеру их подсистем. Оказалось, что сверхновые I типа в спиральных и даже сплюснутых эллиптических системах относятся к промежуточной подсистеме, называемой диском. Присутствие звездной подсистемы диска в эллиптических галактиках сейчас установлено спектральным методом, а у сплюснутых об этой подсистеме говорит и сама линзовидная форма галактик.

Исследования нашей Галактики показывают, что подсистема диска наиболее многочисленна по числу звезд и по их общей массе. Совершенно естественно, что в такой богатой населением подсистеме могут встречаться уникальные экземпляры звезд, дающие вспышки сверхновых I типа. Что касается сверхновых II типа, то среди звезд плоской подсистемы также имеются уникалы. Имп считаются редчайшие, самые массивные горячие сверхгиганты — звезды класса O. Они-то и являются, видимо, на финальном этапе эволюции сверхновыми II и III типов.

Частота вспышек сверхновых

Наши предположения о характере звезд, вспыхивающих как сверхновые, могут существенно проясниться, если мы узнаем, часто или редко происходят вспышки сверхновых в галактиках. Ведь в зависимости от частоты вспышек под подозрением оказываются многочисленные или, наоборот, редкие по численности категории звезд соответствующих звездных подсистем.

Однако простой с виду вопрос на практике оказался весьма сложным. Чтобы ответить на него, потребовалось осуществить большую программу наблюдений, их обработки и, наконец, всестороннего анализа полученных результатов.

В 1937—1940 гг. Цвикки провел для этой цели 40-месячные фотографические наблюдения за 122 районами неба, где имелось в общей сложности 3000 галактик ярче 15-й звездной величины. Это исследование получило название первого паломарского патрулирования сверхновых. Тщательные подсчеты показали, что весь просмотр фотоснимков патрулирования в целом равносильен непрерывному наблюдению за одной галактикой в течение 5155 лет. Во время патрулирования было найдено 12 сверхновых, из них 5 в галактиках ярче 13-й величины (их было в патрулировании 837). Отсюда легко получить средний интервал между вспышками сверхновых в одной галактике, типичной для подвергнутых патрулированию: $5155 \text{ лет} : 12 = 430 \text{ лет}$, причем учет элемента случайности наблюдения двенадцати сверхновых в действительности указывает, что интервал заключен между 600 и 330 годами. По галактикам ярче 13-й величины Цвикки тоже сделал соответствующие подсчеты и получил интервал в 360 лет.

В 1967 г. Оорт и Катгерт подсчитали со значительно меньшей строгостью интервал между вспышками сверхновых в одной галактике по 49 галактикам ярче 11-й звездной величины северного полушария неба. За время около 10 лет в них было 10 сверхновых и после различного рода скидок авторы получили интервал в 50 лет, т. е. в девять раз более короткий, чем в исследовании Цвикки. Такой разницей получается из-за малочисленности находок сверхновых. Для уточнения результатов нужно систематическое патрулирование богатых галактиками участков неба.

Начиная с 1955 г. Цвикки вместе с коллективом астрономов начал второй паломарский патруль сверхновых на 48-дюймовом рефлексоре. Первые результаты 10 лет паломарских наблюдений за двадцатью четырьмя наиболее интенсивно фотографировавшимися участками неба получены Р. Барбоном. Он просмотрел 2144 галактик ярче 15,7 звездной величины и нашел в них 45 сверхновых. Соответствующий фотографический материал равносильен непрерывному наблюдению за одной типичной галактикой в те-

чение 14 233 лет. Это уже внушительное число, и вместе с большим числом обнаруженных сверхновых оно позволяет получить весьма надежные выводы о среднем интервале между вспышками сверхновых в типичной галактике. Действительно, $14\,233 \text{ года} : 45 = 316 \text{ лет}$, а элемент случайности наблюдения именно 45 сверхновых показывает, что действительная величина интервала заключена между 276 и 372 годами. Другими словами, выводы первого паломарского патрулирования теперь надежно подтверждены.

Но, к сожалению, в подсчетах приходится сваливать в одну кучу галактики разных типов и светимостей, а типы сверхновых известны тоже далеко не во всех случаях. Как только выяснилось, что сверхновые делятся на два основных типа, потребовалось выяснить, каковы средние интервалы между вспышками у сверхновых I и II типа. Другими словами, какие сверхновые вспыхивают чаще? Если обратиться к спискам наблюдавшихся 200 сверхновых, то лишь для третьей части известен в той или иной мере их тип. И среди классифицированных по типам сверхновых подавляющее большинство принадлежит к I типу. Но спешить с заключением, что эти именно сверхновые вспыхивают чаще, нельзя. Вспомним, что сверхновые I типа в максимуме блеска примерно на две звездных величины ярче сверхновых II типа.

Бааде, первый заинтересовавшийся этим вопросом, обратил внимание на то, что в числе 5 сверхновых, обнаруженных при первом паломарском патрулировании в галактиках ярче 13-й звездной величины, только одна была II типа, а остальные относились, видимо, к I типу. Учитывая абсолютные величины сверхновых того и другого типа, он пришел к выводу, что в действительности сверхновые II типа должны вспыхивать в шесть раз чаще, чем сверхновые I типа. Другими словами, сверхновые II типа должны вспыхивать в спиральных галактиках со средним интервалом в 50—100 лет.

Однако вывод, сделанный по одному случаю вспышки сверхновой II типа, был, естественно, крайне ненадежен. Исследование Барбона позволяет сделать новые подсчеты. Из 45 сверхновых, найденных в патрулировавшихся участках неба, был известен тип у 16, а теперь оценен еще у трех сверхновых. Из них 15 относятся к I и к сходному с ним IV типу, а 3 сверхновые — ко II типу плюс одна III типа, являющаяся, возможно, разновидностью II типа.

Такой материал уже дает большие основания для расчетов. С учетом разности абсолютных величин (подсчеты сделаны автором) снова получается, что сверхновые II типа вспыхивают в шесть раз чаще, чем сверхновые I типа. Таким образом, Бааде в 1941 г. случайно правильно угадал это число. Итак, интервал между вспышками сверхновых II типа оказывается 50—100 лет.

С 1960 г. ряд исследователей — С. ван ден Берг (Канада), Ю. П. Псковский (СССР), Ф. Цвикки и А. Таммани (Швейцария) — отмечал, что сверхновые чаще вспыхивают в более мощных по светимостям и массе галактиках. Так что средние интервалы между вспышками сверхновых должны выводиться с учетом масс светимостей галактик. Так, Таммани в своем обстоятельном исследовании получил в конечном счете, что средний интервал между вспышками сверхновых в галактиках типа Sc равен 2,5 триллиона лет, деленным на массу галактики, выраженную в массах Солнца. Следовательно, в карликовых спиральных галактиках с абсолютными величинами — 17^m средний интервал между вспышками около 300 лет, а в сверхгигантских (абсолютная звездная величина — 20^m) — около 30 лет. В галактиках типа Sb средние интервалы между вспышками сверхновых в 2—3 раза больше.

Таким образом, сверхновые, действительно, предпочитают гигантские звездные системы. Этим, в частности, объясняется, что в туманности Андромеды за 85 лет были замечены две вспышки сверхновых, а в небольшой по массе туманности Треугольника не наблюдалось ни одной. Галактики, в которых наблюдалось по 2—5 сверхновых, оказались сверхгигантскими. Единственным исключением была лишь галактика, где кроме обычной сверхновой наблюдалась вспышка редкой сверхновой V типа.

Продолжающиеся теперь непрерывно патрулирования галактик с целью обнаружения сверхновых принесут нам все более определенные сведения о том, как часто вспыхивают сверхновые, и расчеты, о которых шла речь, будут расширены и уточнены.

СПЕКТРЫ СВЕРХНОВЫХ
ВО ВРЕМЯ ИХ ВСПЫШЕК

Загадки спектров сверхновых

Спектральные наблюдения внегалактических сверхновых могут помочь разобраться в физическом процессе, идущем в ее излучающей оболочке. Почти 30 лет изучение спектров сверхновых ограничивалось установлением типа звезды, описанием вида спектра и его изменений. Что же скрывается за этими изменениями, оставалось неизвестным.

Самым непонятным и почти полностью не расшифрованным являлся спектр сверхновых I типа, хотя именно их спектры наиболее широко наблюдались — от 9 суток перед максимумом и до 338 суток после него. В самом максимуме блеска и через неделю после него в спектрах не наблюдалось резких деталей. Спектр выглядит сплошным, но его ультрафиолетовая область слабее, чем у обычных звезд, а короче 3700 Å интенсивность спектра сверхновой стремительно понижается.

Изменения со временем можно проследить по рис. 24. Через неделю после максимума становятся заметны яркие полосы и темные промежутки. Контраст между ними постепенно увеличивается. Но что является физически реальной деталью спектра, яркая полоса или темный интервал? Это была одна из загадок спектра сверхновой. Но не единственная. В течение трех недель после максимума цвет сверхновой I типа желтеет и даже краснеет, а спектр ее, сохраняя все детали, сильно слабеет в ультрафиолетовой части (впрочем, может быть, становится ярче красная часть спектра, в этом случае будет такой же эффект). Затем в течение четвертой недели яркая полоса в красной области, пересеченная ранее одним темным промежутком, разделяется на три части двумя новыми темными интервалами и постепенно начинает идти противоположный

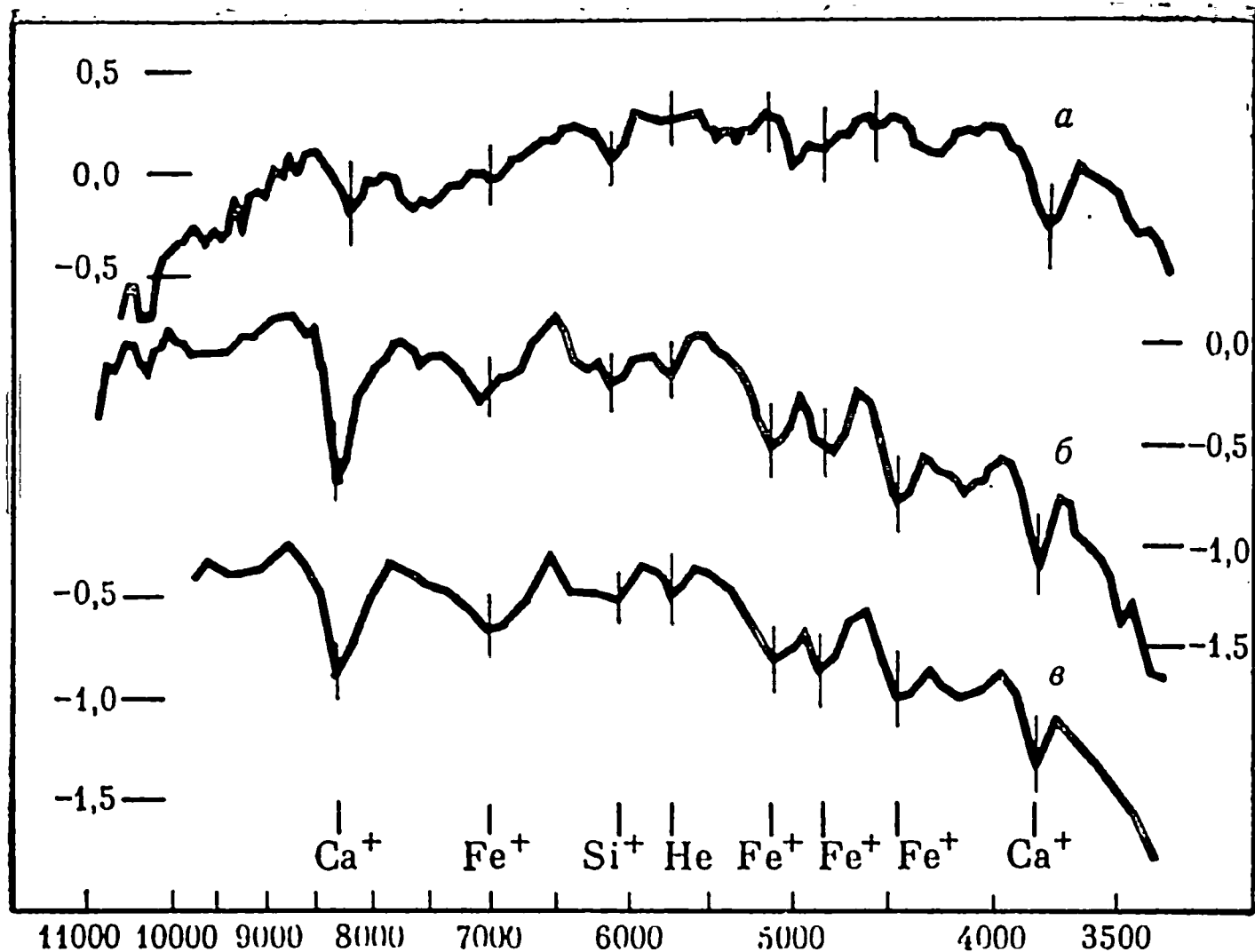


Рис. 24. Изменения со временем в спектре сверхновой 1971 i, принадлежащей к I типу

Под рамкой отмечены длины волн в ангстремах, выше —элементы и их ионы (отмечены знаком +), которым принадлежат важнейшие минимумы (линии поглощения) спектра сверхновой. По вертикальным рамкам отмечены логарифмы относительной интенсивности трех спектров сверхновой: *a* — спустя 2 суток после максимума блеска, *b* — то же спустя 27 суток, *v* —то же спустя 76 суток

процесс — красная часть спектра слабеет по сравнению с ультрафиолетовой и соответственно цвет сверхновой снова из красного становится желтым и белым.

Чтобы разобраться в причинах изменений спектра сверхновой, следовало попытаться расшифровать его детали, т. е. найти в нем спектральные линии, и установить, каким элементам они принадлежат. Такая расшифровка неизвестного спектра бывает очень трудной. Легко поддаются расшифровке спектры звезд, потому что большинство их линий в какой-то мере общие с линиями солнечного спектра и других звезд. Например, в спектрах многих звезд и газовых туманностей одними из сильнейших оказываются линии водорода. Это и неудивительно, потому что звезды и туманности состоят в основном из водорода. В плотных оболочках звезд он образует

линии поглощения в спектре, а в разреженных оболочках и газовых туманностях — яркие линии излучения.

Мы уже знаем, что сверхновые I и II типов различаются тем, что в спектрах сверхновых II типа имеются яркие линии водорода и сравнительно интенсивная ультрафиолетовая часть спектра, в то время как у сверхновых I типа линий водорода не найдено ни в виде ярких, ни в виде темных линий поглощения.

Почему же в спектрах сверхновых I типа нет линий водорода? Конечно, звезды, когда в их ядрах выгорает весь водород и гелий, могут в некоторых случаях взрываться, как сверхновые. Но и тогда в наружных оболочках, выбрасываемых взрывом, водород имеется в достаточном количестве. В астрофизике встречался пока единственный случай, когда водород, присутствуя, не проявляет себя в спектре звезды: у горячих и самых высоких по светимости сверхгигантов линии водорода очень слабы и даже отсутствуют. Причина этого явления — сочетание высокой разреженности оболочки сверхгиганта и высокой температуры, приводящее к полной ионизации водорода.

Однако Э. Р. Мустель указал недавно еще одну, противоположную возможность. Он обратил внимание на то, что ультрафиолетовая часть спектра сверхновой I типа очень слаба, поэтому в ней должно вырабатываться мало квантов, возбуждающих линии водорода в видимой области спектра. Другими словами, если водород в оболочке сверхновой I типа имеется, он должен быть, наоборот, полностью нейтральным и, мало того, невозбужденным. Однако обнаружение Мустелем линий азота в спектре сверхновой, видимо, вообще свидетельствует о незначительном содержании водорода.

Но что же представляют собой остальные детали спектра сверхновой I типа? Еще в 1938 г. Минковский выдвинул гипотезу, что все образования в спектрах сверхновых I типа — сложное сочетание неизвестных запрещенных линий. В действительности в спектре сверхновой I типа на 183-и сутки после максимума блеска появлялись две узкие яркие линии, без труда опознанные Минковским как запрещенные линии нейтрального кислорода. Своим видом они резко отличались от остальных деталей спектра сверхновой, тем не менее Минковский предположил, что и остальные яркие детали в спектре образованы неизвест-

ными запрещенными линиями. Он обратил внимание на то, что яркие линии в спектрах самых горячих звезд не совпадают с яркими деталями спектра сверхновой.

Особенно убедительным выглядело обнаружение четырех ярких деталей, которые немного смещались в красную сторону спектра при переходе к спектрам, полученным несколько суток спустя. Такое смещение могло быть, утверждал Минковский, только в том случае, если спектр сверхновой является скоплением запрещенных линий. В сущности, в нем видны только верхушки ярких линий, сливающиеся в широкие полосы, а сам непрерывный спектр даже в максимуме блеска в десятки раз слабее яркости этих полос. Поэтому там, где запрещенных линий нет (в ультрафиолетовой части спектра короче $3700 \text{ \AA}$ спектр сверхновой I типа обрывается), его не видно.

Но каким элементам и состояниям ионизации принадлежат эти яркие запрещенные линии, оставалось неизвестным. Американские астрофизики Ф. Уиппл и Ц. Пэйн-Гапошкина по-другому подошли к этой загадке спектра сверхновых I типа. Они рассчитали, каким должен быть спектр, составленный из ярких разрешенных линий наиболее распространенных во Вселенной химических элементов при температурах $15\,000\text{--}100\,000^\circ$ и при скорости расширения оболочки сверхновой 6000 км/сек . У них получился спектр, отдаленно похожий на спектр сверхновой I типа.

Выходит, что и версия ярких запрещенных линий, защищаемая Минковским, и версия ярких разрешенных линий в равной степени возможны.

Что касается сверхновых II типа, то, несмотря на обнаружение в их спектрах ярких линий водорода, остальные детали спектров были похожи на детали спектров сверхновых I типа и оставались загадочными.

Таким образом, складывалось впечатление, что взгляд на спектры сверхновых как на совокупность только ярких линий излучения является бесперспективным и от него следует отказаться. Не нужно рассматривать спектры сверхновых как аналогии спектров газовых туманностей и горячих звезд, обладающих яркими линиями. Но попытки расшифровать яркие детали спектров сверхновых долгое время еще продолжались. Так, в 1956 г. В. Бааде, Р. Кристи, У. Фаулер и Ф. Хойл в своем теоретическом исследовании высказали мимоходом предположение, что

яркие полосы в спектрах сверхновых могут быть и молекулярными полосами опять-таки неизвестного происхождения.

Линии поглощения в спектрах сверхновых

Неудачи объяснения ярких деталей спектра сверхновой укрепляют ту точку зрения на расшифровку спектра, которая исходит из того, что главными деталями спектра надо считать темные промежутки — расширенные и неглубокие линии поглощения. Нетрудно догадаться, что, принимая шаг за шагом выводы, следующие из гипотезы о существовании линий поглощения, мы придем к совершенно иному представлению о физических свойствах оболочек сверхновых, чем в случае оболочки с линиями излучения.

В спектрах сверхновых II типа, как и в спектрах новых звезд в стадии сразу после максимума присутствуют как линии излучения, так и линии поглощения, принадлежащие одному и тому же переходу между энергетическими состояниями атома.

Более сложна ситуация с выявлением линий поглощения в спектрах сверхновых I типа. В 1958 г. американский астрофизик Д. Мак-Лафлин, уже знакомый нам по исследованиям новых звезд, попытался расшифровать минимумы в спектрах одной из сверхновых как широкие линии поглощения нейтрального гелия и других элементов. Все эти линии были систематически смещены в фиолетовую сторону спектра. Это указывало на то, что оболочка, в которой они образуются, расширяется со скоростью 5700 км/сек. Работу Мак-Лафлина остро раскритиковал Минковский, который правильно отмечал неубедительность случайных совпадений минимумов с некоторыми смещенными второстепенными линиями гелия, но отвергнуть целиком гипотезу присутствия линий поглощения в спектре сверхновой I типа он не смог. Отметим, что Мак-Лафлин расшифровал спектр не обычной сверхновой I типа, а спектр, обладавший специфическими особенностями.

Десять лет спустя после исследования, проведенного Мак-Лафлином, автор данной книги предложил объяснение обнаруженным в спектре сверхновой I типа линиям поглощения. Из этого объяснения следует простое правило

отыскания линий, которые должны присутствовать в спектрах сверхновых. Было показано, что в случае спектров сверхновых мы имеем дело с эффектом светимости в спектрах, известным по обычным звездам. Но только при изучении спектров звезд, идя от карликов до сверхгигантов, мы привыкли к сравнительно небольшим усилениям линий поглощения некоторых элементов, а в случае сверхновых эти эффекты светимости намного сильнее.

Какие же линии могут быть сильны в газовой оболочке сверхновой звезды, которая вследствие расширения становится все разреженней? Очевидно, те, которые усиливаются с понижением плотности газа, т. е. те, которые характерны для спектров звезд-сверхгигантов. В этом и заключается общий рецепт для отбора ожидаемых в спектре сверхновой линий. Согласно соотношению, выведенному индийским астрофизиком М. Н. Саха, с увеличением разреженности оболочки должны в первую очередь усиливаться линии один раз ионизованных атомов легко ионизируемых элементов и линии неионизованных атомов трудно ионизируемых элементов. В видимой области спектра таких линий среди самых сильных не так уж много. К легко ионизируемым относятся линии кремния, магния, железа, кальция, натрия и алюминия. Но один раз ионизованные атомы двух последних элементов не имеют сильных линий в видимом участке спектра. К трудно ионизируемым элементам относится гелий. Что касается остальных элементов, то их роль в спектрах и нормальных и сверхновых звезд невелика, потому что невелико их содержание в газовой смеси, характерной для звездных оболочек. Об отсутствии же в спектре сверхновой водородных линий уже было сказано ранее.

Сильных линий меньше в красной части спектров звезд, поэтому в ней обычно разобраться легче. Вот и в спектре сверхновой, полученном вскоре после максимума блеска, обнаруживается минимум, соответствующий двум слившимся линиям один раз ионизованного кремния. Он оказался смещенным в фиолетовую часть спектра на величину $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = -0,03$. Но если это действительно линия ионизованного кремния, то в фиолетовой области спектра должны быть следы и другой пары сильных линий этого иона. И действительно, там был найден небольшой минимум с точно таким относительным спект-

ральным смещением! Примерно на третьей неделе после максимума блеска оба минимума в спектре одновременно исчезают.

С таким же относительным спектральным смещением оказались и другие линии ионов наиболее распространенных элементов. И не нашлось исключений, когда сильная линия иона железа, магния или кальция или нейтрального гелия отсутствовала бы в спектре сверхновой. К сожалению, линии некоторых элементов располагаются в спектре близко друг к другу или просто налагаются и трудно выяснить без специального анализа, какая из них вносит главный вклад в образующийся минимум в спектре. Но эта задача обычная для исследования почти каждого спектра звезды.

Здесь следует отметить, что вид линий поглощения в спектрах сверхновых не совсем обычен. Сильная линия в спектре нормальной звезды обычно резко контрастна, ее центр почти темен. В спектрах сверхновых минимумы менее контрастны, неглубоки. В чем же дело? Оказывается, в том, что мы наблюдаем расширяющуюся оболочку. Линия поглощения в спектре расширяющейся газовой оболочки смещается в фиолетовую сторону пропорционально скорости расширения оболочки. Это не единственное следствие расширения. Уменьшается и контраст линии поглощения, а зато сама она расширяется. Эти изменения в форме линии поглощения заметны уже в спектрах новых звезд, но они не так велики, какими оказываются в спектрах сверхновых. Смещение, расширение и уменьшение контраста линии преобразуют ее в спектре сверхновой до неузнаваемости. Кстати, поскольку скорость расширения оболочек сверхновых достигает нескольких тысяч километров в секунду, то слабые спектральные линии в их спектрах почти бесследно расплываются и можно заметить минимумы только самых сильных линий. Разыскивать второстепенные линии оказывается делом бесполезным.

В 1970 г. спектры сверхновых I типа были исследованы Э. Р. Мустелем. Он обратил внимание на сходство положения минимумов в спектрах сверхновых с положением главных линий (кроме водородных) в спектрах Солнца и Новой Геркулеса 1934 г. Были отождествлены линии ионов железа, кальция, кремния и других элементов, причем смещение линий в фиолетовую часть спектра.

снова оказалось равным $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = -0,03$. Таким образом, удалось прийти к расшифровке деталей спектра сверхновой I типа еще и путем сравнения со спектрами новых звезд. Результаты этого отождествления получились аналогичными предшествующему.

Впоследствии Э. Р. Мустель установил, что у сверхновых I типа скорости расширения несколько различны и заключены в пределах, приводящих к смещению минимумов от $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = -0,022$ до $-0,046$. Он указывает на возможное присутствие в минимумах спектров сверхновых кроме основных линий, принадлежащих главным образом ионам железа, линий ионов скандия, титана, ванадия, хрома, никеля. Роль этих ионов второстепенна, так как их относительное содержание в газовой смеси по сравнению с ионами железа невелико.

В 1972 г. французский астрофизик Ш. Гордон, ранее известная исследованиями солнечной короны, предложила новую расшифровку спектров сверхновых I типа. Она признает наличие в спектрах сверхновых линий поглощения, но яркие участки спектров рассматривает, подобно Минковскому, как комплексы запрещенных линий ионов высокой степени ионизации, т. е. корональных линий. Она предполагает, что оболочка сверхновой более чем на 90% состоит из гелия. В самой глубокой зоне ее температура достигает 10 млн. градусов. Здесь и образуются корональные линии. В наружных же зонах оболочки, где температура около 100 тыс. градусов, образуются линии ионов железа и других металлов. А в самых наружных слоях образуются линии нейтрального гелия и других элементов. Высокая температура глубоких слоев оболочки, по мнению Гордон, поддерживается энергией, которая черпается оболочкой из рентгеновского излучения центрального звездного остатка. Однако за объяснение ярких участков спектра сверхновой корональными линиями приходится платить слишком высокую цену: требуется предполагать просто чудовищный расход энергии. Гордон указала возможные корональные линии, причем в спектрах, полученных в разные дни, они выходят неодинаковыми, рассчитать же действительную роль каждой из них в спектре она не смогла.

В заключение следует отметить, что в 1973 г. Минковский в работе, выполненной совместно с Гринстейном, признал наличие линий поглощения в спектрах сверхно-

вых I типа и их отождествление, предложенное советскими астрофизиками. Многочисленные наблюдения спектров яркой сверхновой 1972е, проведенные американским спектроскопистом Дж. Оуком и его коллегами, принесли новые подтверждения правильности отождествления минимумов спектров сверхновых с линиями поглощения: в инфракрасном спектре сверхновой был найден минимум, соответствующий трем слившимся линиям иона кальция, присутствие которого вытекало из наличия в фиолетовой части спектров сверхновых другой пары его линий — H и K.

Физические характеристики оболочек сверхновых

Когда мы говорим о физических условиях в оболочке звезды, мы подразумеваем прежде всего температуру и плотность. С глубиной в звезде эти величины возрастают, а в конечном счете они зависят от общих свойств звезды: ее массы, размеров, возраста. Все это выглядит сравнительно просто для нормальных звезд и неизмеримо сложнее для сверхновых. Дело в том, что к главным характеристикам, отыскиваемым по спектрам звезд, здесь прибавляется еще третья — скорость расширения оболочки, которая регулирует изменение с течением времени остальных характеристик. Чем выше скорость расширения оболочки, тем быстрее падает плотность и изменяется температура излучающего слоя в разлетающейся оболочке. В табл. 14 приводятся важнейшие физические характеристики оболочек сверхновых главных типов.

Таблица 14
ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОЛОЧЕК СВЕРХНОВЫХ

	Типы сверхновых				
	I	II	III	IV	V
Массы оболочек, $M_{\odot}$	0,3	1,0	1,0	—	0,3
Скорость расширения, км/сек	13500	7000	11000	—	2000
Абсолютная величина в максимуме блеска, m	—19	—17	—20	—17	—18
Температура оболочки в максимуме блеска, °K	30000	25000	—	—	25000

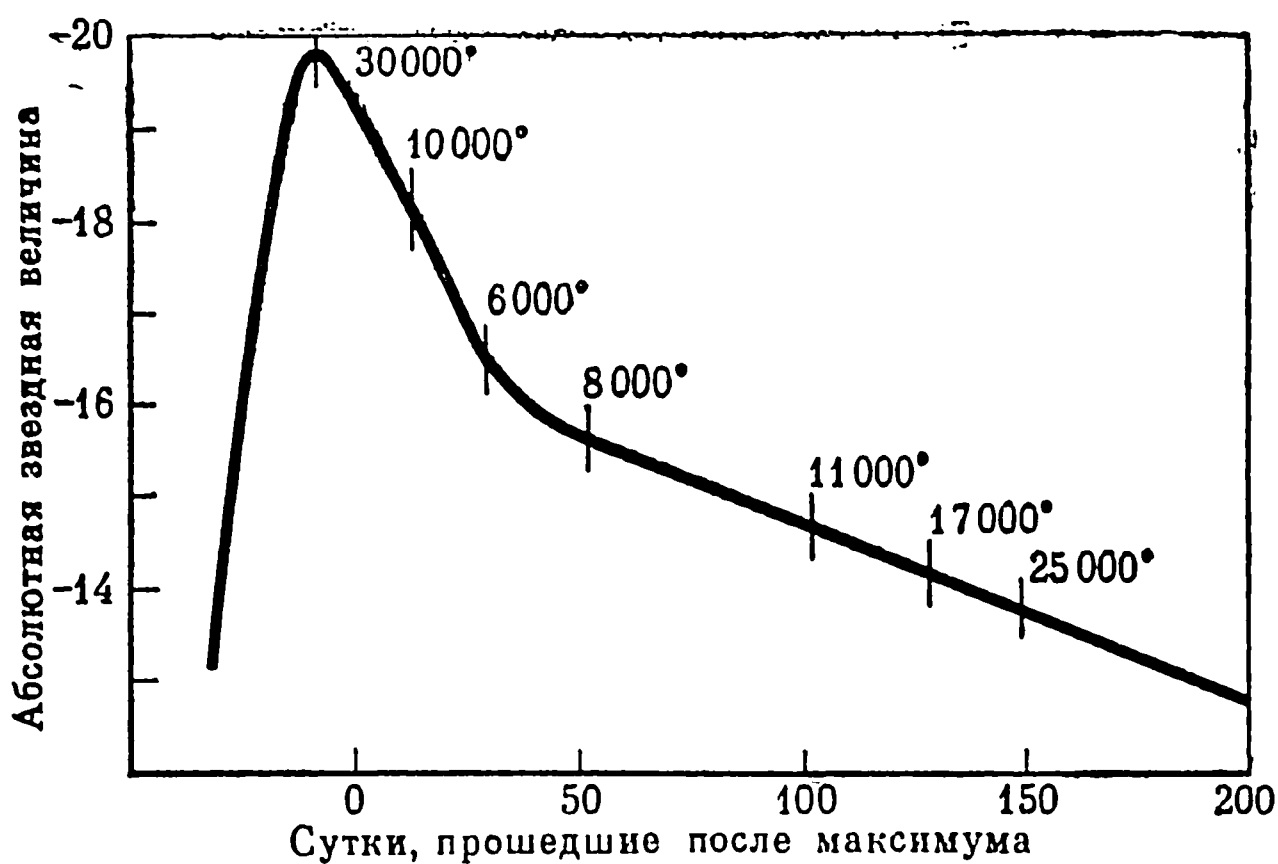


Рис. 25. Кривая блеска сверхновой I типа с отмеченными на ней температурами, найденными по цвету или спектру сверхновой

Что касается оценок температур сверхновых, то до последнего времени они были в сильной степени произвольными. Для сверхновых II типа Минковский без подробных обоснований назвал температуру $40\,000^\circ$, а Халтон Арп по показателям цвета этих сверхновых нашел температуру $25\,000^\circ$. Такую же температуру нашли и у сверхновых V типа. Что касается сверхновых I типа, спектры которых — комплексы линий излучения, то оценки температуры по ним невозможны, если же это спектры с линиями поглощения, то можно получить их цветовые температуры и температуры по показателям цвета. В зависимости от стадии сверхновой I типа температура ее оболочки оценивается таким путем от $6\,000^\circ$ до $10\,000$ — $30\,000^\circ$ (рис. 25).

О плотности оболочек сверхновых мы знаем пока очень мало. Только в одном случае — по появлению на 183-и сутки после максимума блеска в спектре Сверхновой 1937 г. запрещенных линий нейтрального кислорода — ее удалось грубо оценить. Эти запрещенные линии появляются в спектрах горячих газовых туманностей, имеющих температуры от $10\,000$ до $100\,000^\circ$, когда плотность газа ниже 10^{-17} г/см³. В спектрах сверхновых II типа, наблюдавшихся на сотые сутки после максимума, этих запрещенных линий еще не было видно, следовательно, плот-

ность в их оболочках была в это время выше 10^{-17} г/см³ и намного больше, чем в сверхновых I типа.

Этот небогатый материал позволил по размерам оболочек и оценкам плотности рассчитать лишь примерные массы выброшенных сверхновыми оболочек. Кроме того, И. С. Шкловский вычислил массу оболочки той же сверхновой 1937с по изменению интенсивности запрещенных линий. Оба способа дают массу оболочки сверхновой I типа от 0,1 до 0,5 солнечной массы, а для оболочки сверхновой II типа — самое малое около одной массы Солнца. Как мы увидим далее, такие же оценки получаются и для масс оболочек сверхновых, наблюдаемых в нашей Галактике, хотя способы их оценки иные.

Все собранные к настоящему времени сведения о сверхновых указывают на то, что с погружением в глубь оболочки скорость расширения ее слоев убывает, а температура и плотность их увеличивается.

Сейчас астрофизика приблизилась к решению задачи о структуре оболочек сверхновых в стадии максимума блеска и сразу после него.

С вопросами физических условий в звездах и туманностях тесно связан и вопрос о химическом составе газа в этих объектах. Так же обстоит дело и с оболочками сверхновых. Выяснение химического состава оболочек сверхновых только начинается. В этом направлении астрофизики встречают большие трудности, потому что проблема химического состава небесных тел вообще относится к числу труднейших. В случае же сверхновых препятствия особенно велики, так как пока мы не умеем столь же свободно анализировать их спектры, как научились это делать у обычных звезд и туманностей. Но и здесь уже появились первые успехи.

В последние годы английские астрономы Б. Бренч и Д. Пэтчетт и американский астрофизик Дж. Гринстейн снова применили способ построения синтетических спектров сверхновых, применявшийся когда-то Уинплом и Пэйн-Гапошкиной. Они подвергли теперь исследованию спектры сверхновых II и V типов и, в частности, обнаружили, что в спектре сверхновой V типа имеется по крайней мере четырехкратный избышек водородных атомов по сравнению с количеством атомов гелия, если сравнить их с содержанием в обычных горячих газовых туманностях. Зато содержание атомов металлов в этой сверхно-

вой по отношению к железу, по-видимому, такое же, как в газовых туманностях и солнечном газе.

Наконец, Э. Р. Мустель нашел в инфракрасной части спектра сверхновой I типа линии поглощения азота. Условия возбуждения линий азота, кислорода, углерода и водорода в спектрах звезд очень сходны, поэтому присутствие линий азота при отсутствии следов остальных элементов должно указывать на то, что азот в оболочках сверхновых очень обилен. Мустель полагает, что азота больше, чем водорода, не менее чем в десять раз. Излишек азота обнаружен, как мы увидим далее, и в старых остатках оболочек сверхновых звезд. Почему же именно азот? При термоядерных реакциях превращения водорода в гелий в ходе так называемого азотноуглеродного цикла образуются как побочный продукт и скапливаются ядра именно азота.

ВСПЫШКИ СВЕРХНОВЫХ
В НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ

Открытие остатков галактических сверхновых

Первым о вспышках сверхновых в нашей Галактике заговорил в 1921 г. К. Лундмарк. Он считал, что яркие вспышки, наблюдавшиеся в древние и средние века, были, вероятно, галактическими новыми и теми яркими вспышками, которые позже получили название сверхновых. В числе вспышек, отмеченных Лундмарком, была и наблюдавшаяся в Китае в 1054 г. В своих примечаниях он отметил, что место этой вспышки близко к Крабовидной туманности. Любопытно, что в том же 1921 г. американский исследователь Дункан исследовал эту туманность и обнаружил, что она систематически расширяется, а длительность разлета составляет около девяти веков.

Нам сейчас легко сопоставить эти два факта — совпадение начала разлета со временем вспышки на том же месте. Однако ни Лундмарк, ни Дункан в 1921 г. или позже, когда узнали о работах друг друга, такого вывода не сделали. Только в 1928 г. Э. Хаббл мимоходом впервые отметил это совпадение, но и его вывод не был замечен. Прошло еще десять лет и Лундмарк твердо заявил о том же. Он установил по японским описаниям, что вспышка была, по блеску сравнима с Юпитером, а поскольку расстояние до Крабовидной туманности тогда было уже известно, нашел, что абсолютная величина вспышки намного выше, чем у обычной новой. Этим доказано, что в 1054 г. в Галактике, действительно, произошла вспышка сверхновой. Не менее важно было и установление того факта, что на месте вспышки осталась расширяющаяся туманность.

Исследователи сейчас иногда удивляются, почему Лундмарк не смог установить тождество вспышки и Крабовидной туманности в начале 20-х годов. Между тем дело объясняется просто: в наиболее точном описании места

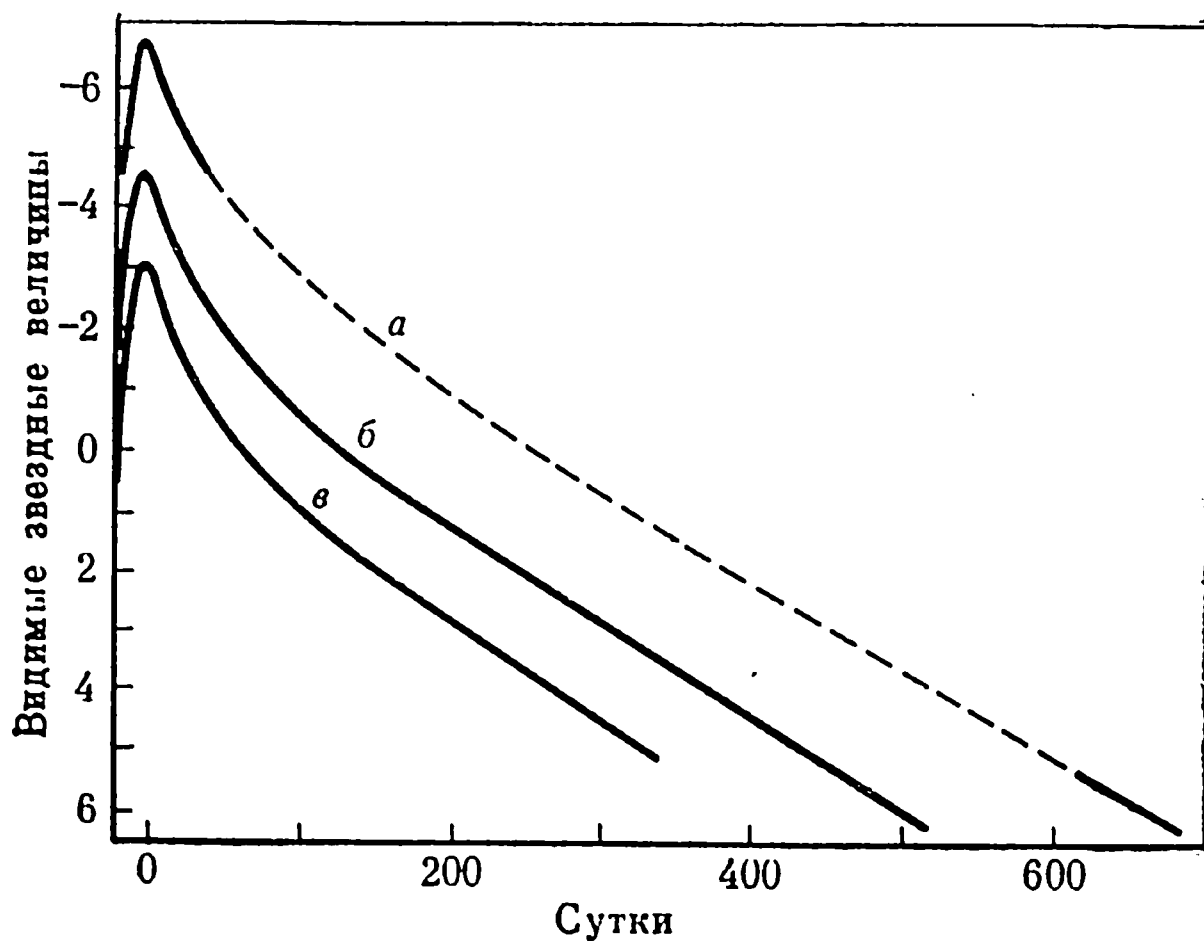


Рис. 26. Кривые блеска галактических сверхновых
a — сверхновая 1054 г., *б* — сверхновая Тихо Браге 1572 г.,
в — сверхновая Кеплера 1604 г.

вспышки говорилось, что она произошла юго-восточнее звезды «Тьен-Куан» (Дзета Тельца), а Крабовидная туманность находится северо-западнее этой звезды. В китайской хронике, по-видимому, была ошибка. Другие описания говорили просто о районе возле «Тьен-Куан» и не противоречили отождествлению с Крабовидной туманностью, но считались менее точными.

В 1943—1945 гг. В. Бааде нашел доказательства вспышек еще двух сверхновых. Это были самые яркие вспышки накануне начала телескопической эпохи, известные как Новая Тихо Браге 1572 г. и Новая Иоганна Кеплера 1604 г. Бааде изучил их оценки блеска, описанные Браге, Кеплером и его современниками. Обычно блеск новой сравнивали с блеском планет и соседних звезд. Теперь хорошо известны звездные величины планет для любого момента в прошлом и звездные величины видимых простым глазом звезд. Это и позволило восстановить кривые блеска обеих ярких вспышек. Недавно были найдены еще и корейские исторические записи о Новой Кеплера, пополнившие европейские наблюдения, собранные Бааде. И та и другая звезда в максимуме блеска достигали блеска Венеры (-4^m). Но самое интересное то,

что их кривые блеска оказались аналогичными кривым блеска сверхновых I типа (рис. 26). Это и было веским доводом для отнесения вспышки к сверхновым. Кроме того, сначала у Новой Кеплера, а затем и у Новой Браге на месте вспышек были обнаружены слабые клочковато-волокнуистые туманности.

Итак, на месте несомненных сверхновых обнаруживаются клочковато-волокнуистые туманности. Хотя Крабовидная туманность и обе обнаруженные Бааде туманности на местах вспышек 1572 и 1604 гг. непохожи в деталях друг на друга, это был все же новый признак для поисков сверхновых в нашей Галактике, в том числе тех, которые по тем или иным обстоятельствам не наблюдались как вспышки в прошлом.

Поэтому было вполне естественным предположение, выдвинутое в 1946 г. Оортом, что большая волокнуистая туманность в созвездии Лебедя тоже является остатком сверхновой, давно затормозившимся в межзвездном газе. Таких волокнуистых туманностей на небе найдено около трех десятков. Самые яркие из них изучены советскими астрофизиками Г. А. Шайном и В. Ф. Газе. Все эти остатки сверхновых имеют возрасты в десятки тысяч лет.

Но открытием газовых остатков сверхновых не завершился поиск характерных свойств галактических сверхновых. В 1948 г. были обнаружены первые сильные источники космического радиоизлучения, некоторые из них лежали в области Млечного Пути. Это Стрелец-А (впоследствии оказавшийся ядром Галактики), Кассиопея-А, Телец-А. В то время радиотелескопы определяли положение радиоисточника на небе очень грубо, но все же уже через год австралийский радиоастроном Дж. Болтон и его коллеги обнаружили, что открытый ими ранее радиоисточник Телец-А по положению совпадает с Крабовидной туманностью.

Исследование радиоисточника Телец-А на нескольких длинах волн показало, что интенсивность увеличивается с переходом к более длинным волнам. Это был важный факт, последствия которого были осмыслены позже. Мы уже знаем, что нагретые небесные тела излучают волны и в радиодиапазоне, но если источник излучения тепловой, то его интенсивность на радиоволнах убывает с переходом к более длинным волнам. В случае же Крабовидной туманности ход изменения интенсивности радио-

излучения с длиной волны иной: интенсивность возрастает с увеличением длин волн. Это показывает, что радиоизлучение объекта имеет нетепловой характер. Забегая вперед, отметим, что кроме остатков сверхновых нетепловое радиоизлучение имеется только у внегалактических радиоисточников: радиогалактик, квазаров. Слабое нетепловое радиоизлучение порождает также межзвездная среда в спиральных рукавах.

О природе нетеплового радиоизлучения мы говорили в главе II.

Обнаружение нетеплового радиоизлучения у Крабовидной туманности толкнуло на поиски остатков сверхновых по этому новому признаку. В 1952 г. Бааде нашел на месте, где наблюдается радиоисточник Кассиопея-А, слабую волокнистую туманность. Советские астрономы П. П. Паренаго и И. С. Шкловский высказали предположение, что это тоже остаток сверхновой, возможно наблюдавшийся в древнем Китае (в созвездии Кассиопеи древние наблюдатели видели много вспышек). Другие исследователи, например Минковский, не согласились с их точкой зрения.

Но в 1955 г. Минковский смог измерить движение сгустков этой туманности и обнаружил, что она, несмотря на несходство с Крабовидной туманностью, также является частью быстро расширяющейся оболочки. Ему пришлось отказаться от своих возражений. По расширению туманности обнаружился также удивительно короткий возраст сверхновой. Самые новые полные исследования дают дату вспышки около 1667 г. с неуверенностью около 8 лет. Значит, она была уже после сверхновых Тихо и Кеплера, в эпоху телескопов Яна Гевелия, а между тем ее не видели в таком всегда доступном наблюдению не заходящем в умеренных широтах нашего полушария созвездии Кассиопеи. Открытая благодаря радиоастрономии самая молодая сверхновая нашего района Галактики оказалась во многих отношениях исключительно интересным объектом.

К настоящему времени радиоастрономия позволила разыскать 120 нетепловых радиоисточников, принадлежащих нашей Галактике. Они являются не чем иным, как старыми остатками сверхновых разного возраста. Но каковы типы галактических сверхновых? К сожалению, в эпоху вспышек сверхновых Тихо и Кеплера не было

еще спектрального анализа, и об их типе мы можем судить косвенно — по сходству их кривых блеска с кривыми блеска сверхновых I типа. А другие две молодые сверхновые — 1054 г. и Кассиопея-А, — по-видимому, какие-то уникальные сверхновые. Их относили и к I и II типам соответственно, затем — ко II и III типам, но мы очень мало знаем о сверхновых, чтобы твердо разобраться в этом вопросе по единственным экземплярам сверхновых в нашей Галактике.

Наблюдения сверхновых в древности

Исследования сверхновых в других галактиках показали, что в звездных системах, подобных нашей Галактике, они вспыхивают с интервалами в 50—100 лет. А между тем за последнее тысячелетие было найдено лишь четыре молодых остатка сверхновых. Не мало ли это?

Три из найденных галактических сверхновых достигали — 4-й звездной величины. И это не случайность, а явное следствие высокой светимости сверхновых.

Чтобы вспышка звезды была легко обнаружена простым глазом, она должна быть по крайней мере 3-й звездной величины, чтобы нарушать привычные фигуры созвездий и поэтому бросаться в глаза. Такую величину в максимуме блеска будет иметь новая звезда, если она расположена от нас не далее тысячи световых лет. Зато сверхновая, вспыхнувшая в самой отдаленной части нашей Галактики, имела бы в максимуме нулевую звездную величину и наблюдалась бы значительное время, если бы в Галактике не было межзвездного поглощения. Но последнее снижает возможности наблюдения оптическими средствами далеких галактических сверхновых, если они лежат в Млечном Пути. В частности, как мы увидим далее, исследователи находят, что в направлении Кассиопеи-А поглощение ослабляет блеск остатка на 7—10 звездных величин, поэтому вспышка этой сверхновой и не была замечена в середине XVII в. Но есть и другое мнение, что вспышка этой сверхновой была значительно раньше — в конце XVI в. — и наблюдалась корейскими астрономами.

Однако можно сделать и такой расчет: четыре известные нам сверхновые вспыхивали в зоне, составляющей около 20% галактического диска, а за тысячелетие на

такую зону и должно выпадать не более четырех вспышек. Навряд ли была поэтому пропущена еще одна вспышка.

Но межзвездное поглощение все же может вносить большие искажения в такие численные прикидки. Иное дело радиоастрономия, которая позволяет вести поиски молодых нетепловых радиоисточников в Галактике без опасности прозевать такой источник из-за большого оптического поглощения. К сожалению, ни вблизи Солнца, ни в далеких частях Галактики таких молодых остатков сверхновых радиоастрономия не нашла. Правда, в той половине Галактики, которая расположена за ее ядром, могут быть молодые сверхновые, но их трудно выявить в мешанине других радиоизлучающих деталей Галактики.

Все же факт остается фактом: бесспорных молодых остатков старше Крабовидной туманности на 1000—10 000 лет не найдено. Есть лишь некоторые предположения. Зато найдено более сотни старых остатков с возрастaми в тысячи и десятки тысяч лет. Такой разрыв в наблюдаемости остатков сверхновых выглядит как парадокс, более удивительный, чем отсутствие вспышек сверхновых в Галактике с 1667 г. до сего времени.

Посмотрим теперь, что говорят древние летописи.

Сбором старых сведений о вспышках звезд, появлениях комет и других необычных явлениях занялись давно. Первые сведения, собранные по ближневосточным, китайским и европейским источникам, принадлежат французскому исследователю комет А. Гюю Пингре, который в 1783 г. издал двухтомный труд «Кометография». Он располагал переводами средневековой китайской энциклопедии «Вэньсянь тункао», составленной Ма Дуань-линем, и некоторых манускриптов, часть которых бесследно затерялась в эпоху Французской революции.

63 года спустя другой французский исследователь Ж. Батист Био вновь опубликовал перевод астрономических глав энциклопедии Ма Дуань-линя, а в 1850 г. немецкий естествоиспытатель А. Гумбольдт составил список двух десятков вспышек звезд по китайским, ближневосточным и европейским источникам. Но все эти списки были неполными по сравнению с книгой Пингре. О ней не вспомнили и составители списков звездных вспышек, работавшие в нашем столетии, в том числе Лундмарк и

исследователи в странах Юго-Восточной Азии, занявшиеся серьезными поисками сведений о вспышках звезд по древним рукописям.

Полнейшее собрание всех явлений, считавшихся по тем или иным причинам вспышками звезд, было сделано в 1971 г. автором данной книги. Из 214 таких случаев 125 были, по-видимому, действительно вспышками.

Обычно считалось, что будто в Европе и на Ближнем Востоке наблюдалось всего 5—7 случаев вспышек, а остальные — только на Дальнем Востоке. Рассмотрение материалов Пенгре показало, что в действительности западные наблюдатели отметили 25 вспышек. Это было очень полезно для перекрестного сравнения описаний явлений, как мы это видели уже в главе о повторных новых.

Какие же из числа 125 вспышек были сверхновыми? В 1955 г., когда китайский исследователь Си Цзе-чжун составил свой обширный список, он попытался отнести к сверхновым все случаи вспышек, более или менее близкие к наблюдаемым на небе газовым туманностям и сильным радиоисточникам. Было также много и других попыток отнести вспышки к тем или иным остаткам

Таблица 15
ДРЕВНИЕ ВСПЫШКИ ЗВЕЗД, ПОДОЗРЕВАЕМЫЕ КАК
СВЕРХНОВЫЕ

Год вспышки	Созвездие	Дли- тельность наблю- дений, сутки	Видимая звездная величина в макси- муме, <i>m</i>	Остаток после вспышки	Наиболее вероятная квалификация вспышки
2241 г. до н. э.	?	?	—10	Не найден	Новая или сверхновая (?)
185 г. н. э.	Центавр	Более 60	—2	Есть (?)	Сверхновая (?)
902	Кассиопея	Около 350	0	То же	То же
1006	Волк	220	—10	Не найден	Новая (?)
1054	Телец	670	—4	Крабовидная туманность	Сверхновая
1181	Персей	Более 180	—2	Есть (?)	Сверхновая (?)
1572	Кассиопея	485	—4	То же	Сверхновая Тихо Браге
1592	То же	450	0 (?)	Кассиопея-А (?)	Сверхновая (?)
1604	Змееносец	365	—3	Есть	Сверхновая Кеплера

сверхновых, теперь признанных неправильными. Задача выявления сверхновых в списках древних вспышек оказалась непростой.

Можно предполагать всего 9 возможных вспышек сверхновых, наблюдавшихся за 4270 лет (табл. 15). Но число вспышек, похожих по описаниям на сверхновые (большая яркость, видимость днем, большая длительность наблюдения, характерный желтый цвет или изменение цвета с белого на красный, а затем желтый, близость к Млечному Пути), значительно больше. Если исключить из указанной девятки три известных сверхновых 1054, 1572 и 1604 гг., то остается шесть подозрительных случаев. Мы займемся ими далее.

Новые или сверхновые?

Самые древние вспышки, известные в настоящее время, относятся к 2296 и 2241 гг. до н. э. Они описаны Пенгре. Первая из вспышек была либо новой звездой, либо кометой, а вторая — 2241 г. до н. э. — более похожа на сверхновую, но в каком созвездии или месте на небе, в каком месяце происходили эти вспышки, не известно.

Вторая по древности наблюдений сверхновая замечена в Китае 7 декабря 185 г. н. э. и была видна до июля 186 г. Вот как описывается это явление: «В период Чжун-Цин, во второй год, 10-ю луну в день Квэй-Хао появилась необыкновенная звезда посредине Нан-Мэн. Она была величиной с бамбуковые счеты и последовательно показывала пять цветов. Постепенно она уменьшала свой блеск к 6-й луне следующего года, когда исчезла». В этом описании имеются точная дата явления, его длительность и место, указан также характер явления: неподвижность среди звезд, ослабление блеска, изменение цвета. Эти характеристики типичны для сверхновой.

Нужно сказать, что в китайских летописях даты указываются по лунному календарю (месяц лунный и называется «луной» с началом в новолуние), причем годы считались по периодам правления императоров (такой обычай был и в Римской империи). В китайской летописи почти без пропусков регистрировались все — солнечные затмения на территории Китая. Поскольку теория солнечных затмений позволяет вычислить дату и место

полной фазы любого затмения в прошлом, это является прекрасным средством установления дат событий одновременных с затмениями.

Далее описание говорит о длительности явления: около 225 суток. В максимуме блеска вспышка, следовательно, могла быть ярче Всперы. Но что же все-таки это было: новая или сверхновая? Ответ дает указание на то, что вспышка «сменила пять цветов». Новые звезды практически не изменяют свой цвет, тогда как сверхновые перед максимумом голубоватые, в максимуме блеска белые, а после максимума становятся желтыми, оранжевыми и красными. Через месяц после максимума цвет сверхновой начинает меняться в обратном направлении: с красного до белого. Какие-то пять цветов из перечисленных и отметили древние наблюдатели. Некоторые, правда, предполагают, что изменение цветов было связано с мерцанием звезды низко над горизонтом, но такое радужное переливание настолько обычно, что его отмечать не было смысла. Поэтому можно уверенно считать, что в 185 г. была вспышка сверхновой.

Найден ли ее остаток? Место вспышки было указано очень грубо, но австралийские радиоастрономы нашли там несколько нетепловых радиоисточников, не связанных с какими-либо газовыми туманностями. Один из них предполагается остатком вспышки сверхновой 185 г., но пока этот объект серьезно не изучен. Плохо известны его расстояние, размеры, возраст, и вполне может оказаться, что его возраст больше, чем возраст вспышки 185 г.

Китайский исследователь астрономических древних хроник Си Цзе-чжун считает, что вспышка в созвездии У-чэ («Пять телег») в мае 668 г., светившая 22 суток, была сверхновой, так как в указанном районе неба имеется сейчас заметный нетепловой радиоисточник. Кстати, перед открытием вспышки был сезон ненастной погоды (весенний муссон), так что в действительности вспышка могла быть дольше и ярче. Но радиоисточник оказался намного старше приписываемой ему вспышки. Как в китайской, так и в японской хрониках объект 668 г. единодушно назывался хвостатой кометой.

Следующее интересное, но крайне противоречивое явление, связываемое со сверхновыми, относится к февралю 902 г. Китайские наблюдатели отмечали тогда: «Звезда-

гостья как бы персик появилась в Цзу-Вей под созвездием Хуа-Гай. Она постепенно двигалась к созвездию Ю-Ню... В следующем году она была еще видна».

Судя по движению, объект должен быть кометой, но комету не могли наблюдать дольше 4—6 месяцев вследствие годичного движения Земли. Однако, судя по длительности явления (350 суток), это могла быть вспышка очень высокой яркости, свободно наблюдавшаяся и днем, но об этом нет сведений. Таким образом, ни предположение о комете, ни предположение о вспышке не являются безупречными.

Если это была вспышка, то «персик», возможно, указывает на цвет вспышки. Новые звезды обычно белого цвета, а сверхновые могут некоторое время быть сходными по цвету с персиком. Область Цзу-Вей — это северные незаходящие звезды, Хуа-Гай — созвездие Цефея, следовательно, вспышка была между Цефеем и Кассиопеей, в Млечном Пути, особенно богатом в этой области туманностями и радиосточниками. Советские астрономы Б. А. Воронцов-Вельяминов и вслед за ним Ю. П. Псковский считали, что это была вспышка, после которой осталась туманность «Полумесяц». У нее теперь найдено нетепловое радиоизлучение, но его характер свидетельствует о глубокой старости объекта, так что связывать его со вспышкой 902 г. нельзя.

Итак, комета, новая звезда или сверхновая? Вопрос остается пока открытым. Но все же вероятно, что это была какая-то вспышка. В пользу этого, возможно, говорит то, что в начале X в. новую звезду в Кассиопее видели также и в Европе. Это утверждает современник Тихо Браге астроном и математик Киприан Леовитиус. Он грубо датировал явление временем правления императора Оттона I, останавливаясь на 945 г. — дате смерти императора, поскольку, как мы уже видели ранее, явлениям вспышек звезд и комет приписывалась связь с событиями такого рода.

Особенно многочисленны сведения о вспышках, происшедших в XI в. — в 1006 и 1054 гг. Достаточно указать, что о вспышке 1006 г. в созвездии Скорпиона найдены упоминания в четырех арабских, одной европейской, одной корейской, двух японских и пяти китайских хрониках. Летописцы, описывавшие события, не всегда были про-

профессиональными наблюдателями и очевидцами, иногда они писали со слов других, иногда по памяти. Поэтому особенно ценны описания специалистов. Таким был астролог Али бен Ридван, подробно описавший явление, виденное им лично в молодости. Он хорошо помнил положение планет, и американский исследователь Б. Голдстейн смог установить дату и место явления на небе. То же было найдено и по описаниям китайского придворного астронома.

В описаниях явления 1006 г. есть очевидные преувеличения и некоторая путаница. Так, в одной из китайских хроник говорится, что эту звезду-гостью наблюдали и десять лет спустя. А Али бен Ридван оценивал звезду по величине, равной четверти яркости Луны. Из этих двух утверждений вытекало, что звезду можно было бы видеть днем в течение нескольких месяцев, но ни одна из перечисленных хроник об этом важном факте не упоминает, хотя о вспышке 1054 г., наблюдавшейся днем в течение 23 суток, такие упоминания были. По-видимому, оба утверждения нереальны.

Большинство астрономов полагает, что в 1006 г. была вспышка сверхновой, но долго не находили радиоисточника, который остался после нее. Сейчас найден такой объект, но он очень слаб и сомнительно, чтобы он произошел в результате вспышки 1006 г. Другое предположение выдвинуто автором этой книги: в 1006 г. была вспышка близкой новой. В этом случае, естественно, остатка сверхновой не должно быть, а на месте вспышки нужно искать бывшую новую, по всей вероятности, затменно-переменную звезду 10-й величины. Такие объекты в районе вспышки имеются, например, IP Наугольника. Исследование такой близкой успокоившейся новой может оказаться очень интересным.

Много описаний имеет вспышка 1181 г., которая наблюдалась в Китае, Японии и в Европе. Она была видна 185 суток, имела одно время «сине-желтый цвет» и по блеску равнялась Юпитеру. Утверждалось даже, что «с 1006 года до настоящего времени не было новой звезды, блеск которой превышал бы ее» (книги «Зеркало моей жены» на японском языке), но это, возможно, преувеличение, поскольку вспышка 1054 г. была ярче и наблюдалась японцами. Место вспышки — снова созвездие Кассиопеи. Возможно, что один из радиоисточников, откры-

тый еще в 1952 г., связан с ней. Но этот вопрос как следует не изучен.

Неожиданный сюрприз астрономам принесли недавно изученные корейские рукописи. Из описания явлений 1592 г. следует, что в этом году в созвездии Кассиопеи 100 суток наблюдалась звезда. Она, возможно, и была тем объектом, после которого остался радиисточник Кассиопея-А. Такую точку зрения отстаивает астроном П. Броше (ФРГ). С его аргументами мы познакомимся позже, когда будем рассматривать подробнее остатки сверхновых.

РЕЛИКТЫ ОБОЛОЧЕК СВЕРХНОВЫХ

Крабовидная туманность и другие

Мы уже говорили, что история сверхновых в нашей Галактике тесно связана с изучением вспышки 1054 г. и ее остатка — Крабовидной туманности. Это первая туманность, у которой было обнаружено расширение, начавшееся во время вспышки сверхновой. Она оказалась также первым сильным источником радиоизлучения, совпавшим с газовым остатком в нашей Галактике. Но этим не исчерпываются открытия, прославившие Крабовидную туманность. Она оказалась еще и первым объектом за пределами Солнечной системы, в котором обнаружено сильное рентгеновское излучение. В центре туманности одна из сравнительно слабых звездочек оказалась уникальным по свойствам объектом — звездным остатком сверхновой.

В этой главе мы познакомимся подробнее с газовыми остатками сверхновых, образовавшимися в результате выброса расширяющихся оболочек, а со звездными реликтами сверхновых встретимся в следующей главе.

Итак, почти каждый шаг в изучении остатков сверхновых начинается с Крабовидной туманности. Это, очевидно, связано с тем, что она самый близкий из молодых объектов такого рода. Как правило, если мы хотим привести яркий пример остатка сверхновой, то обычно вспоминаем Крабовидную туманность. Однако изучение остальных молодых и старых остатков показало, что в случае Крабовидной туманности мы имеем скорее не типичный, а уникальный по целому ряду свойств объект, непохожий по существенным чертам на остальные.

Вообще остатки оболочек сверхновых очень разнообразны по виду на фотографиях, но более или менее сходны по свойствам радиоизлучения. Современные ра-

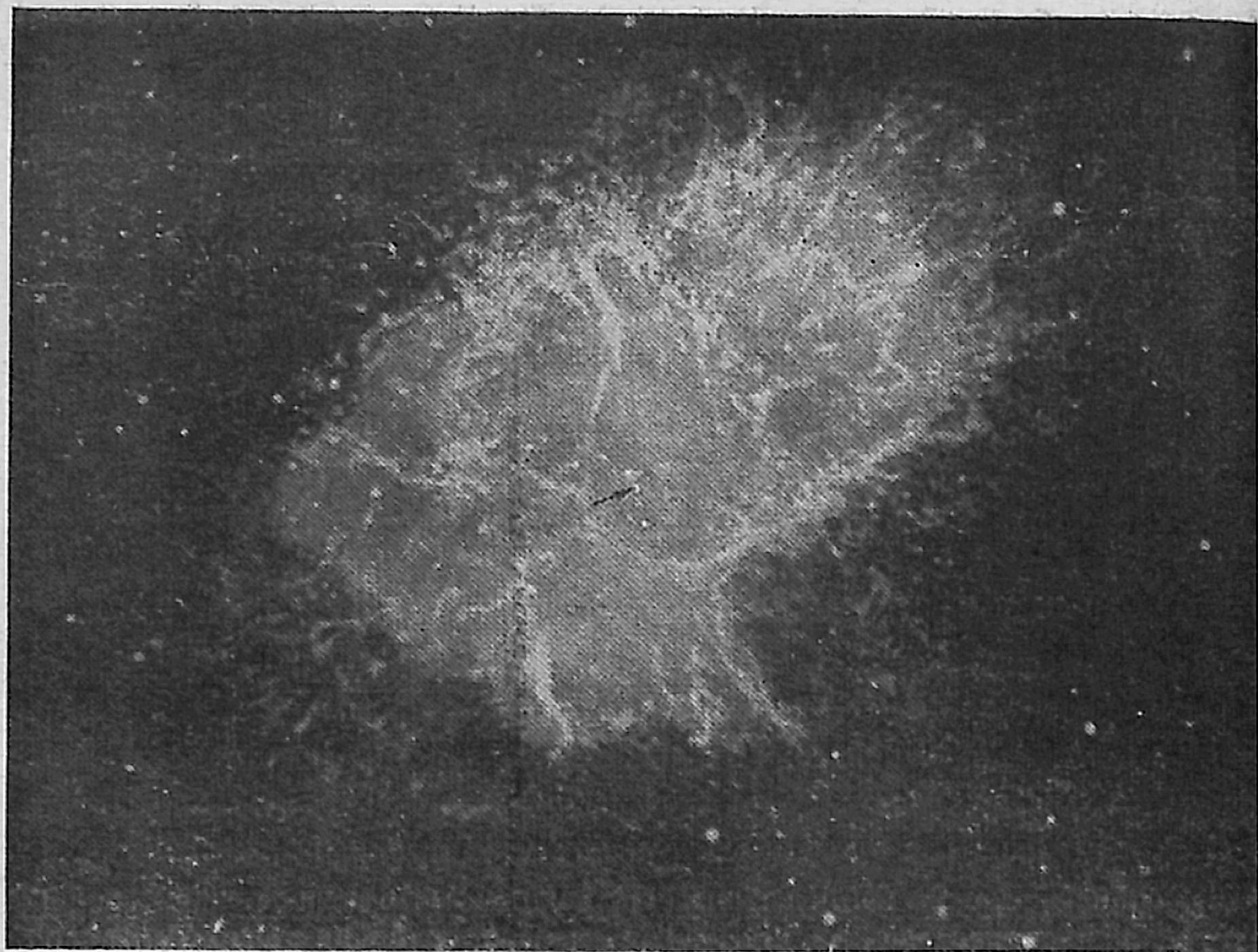


Рис. 27. Фотография Крабовидной туманности на фотографической эмульсии, хорошо чувствительной к красным лучам. Видны многочисленные прожилки газовых волокон и слабый аморфный фон туманности

Стрелкой отмечена звезда, оказавшаяся пульсаром

диотелескопы позволяют получать подробные так называемые радиоизображения остатков сверхновых. Сочетание фотоснимка с таким радиоизображением наиболее правильно и наглядно характеризует вид остатка сверхновой.

Крабовидная туманность на снимках получается неоднородным газовым сгустком, в котором проступает сеть тонковолокнистых красных прожилок, создающих рисунок, напоминающий краба (рис. 27). Это волокнистое строение туманности особенно четко получается на снимках, полученных с красными фильтрами. Аморфная же масса туманности, видимая между прожилками, имеет непрерывный спектр и создает 80% излучения туманности. Ее яркость возрастает к центру туманности. Такое же возрастание к центру наблюдается и в яркости радиоизлучения этого объекта (рис. 28). А в центре туманности, как уже упоминалось, обнаружен звездный остаток сверхновой.

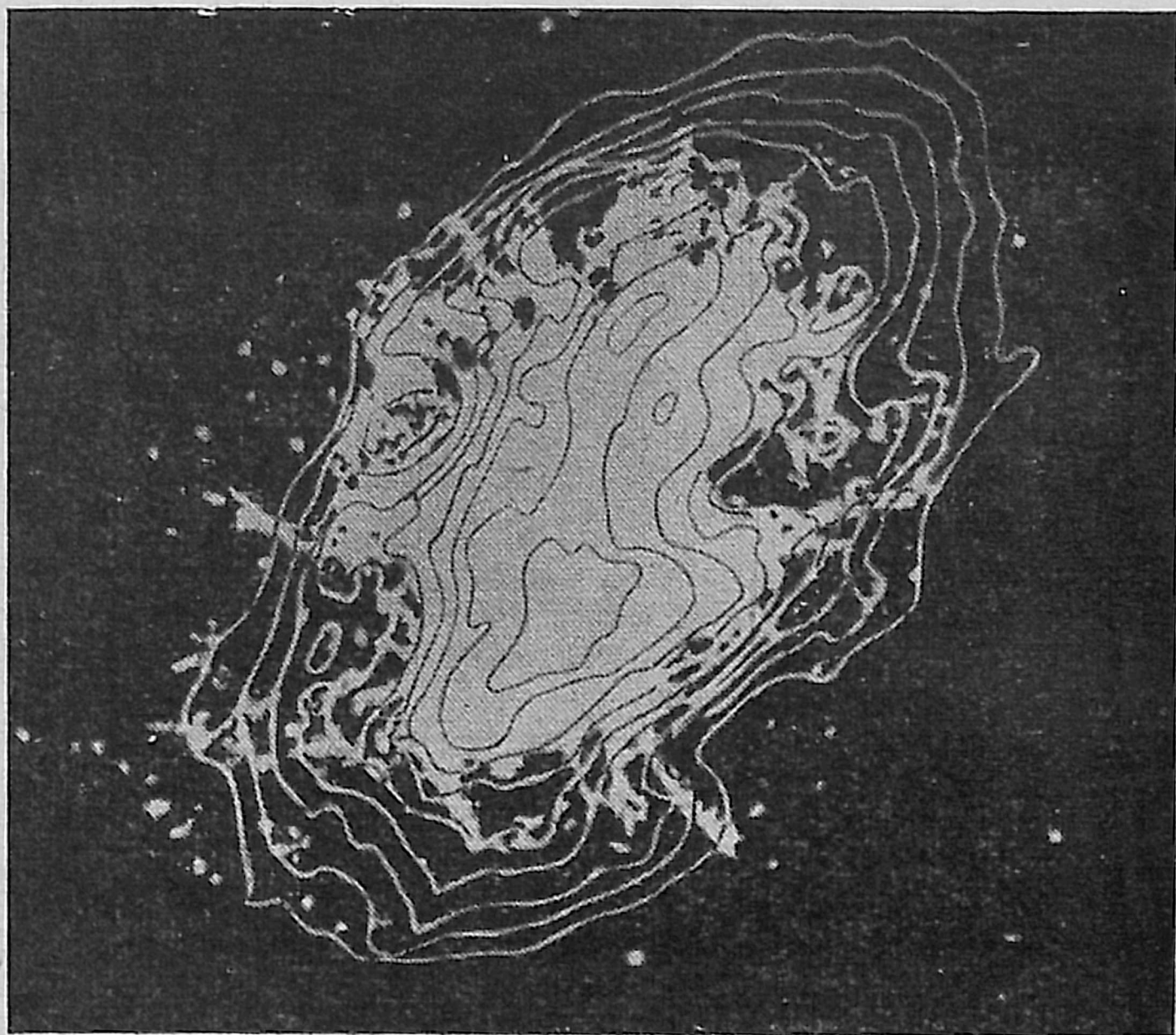


Рис. 28. Фотография Крабовидной туманности с наложенными на нее горизонталями яркости радиоизображения на длине волны 11 см

Следует отметить, что ни у одной другой туманности, являющейся остатком сверхновой, нет и следов аморфной массы и возрастания яркости к центру как в оптической, так и в радиоволновой областях излучения. В этом отношении для большинства остатков сверхновых типичным является уже знакомый нам объект Кассиопея-А. На снимках, полученных на 5-метровом телескопе с красным фильтром, заметно, что оптические детали остатка не образуют сплошной аморфной туманности, а состоят из мелких сгустков и волокон. Правда, эти детали оказываются опять-таки уникальной особенностью на этот раз Кассиопеи-А, но зато форма и характер радиоизлучения этого объекта аналогичны остальным молодым и старым остаткам, за редкими, быть может, исключениями. Как видно из рис. 29, остаток сверхновой в радиоизлучении представляет собой горячую расширяющуюся оболочку, наиболее яркими частями которой являются толстые

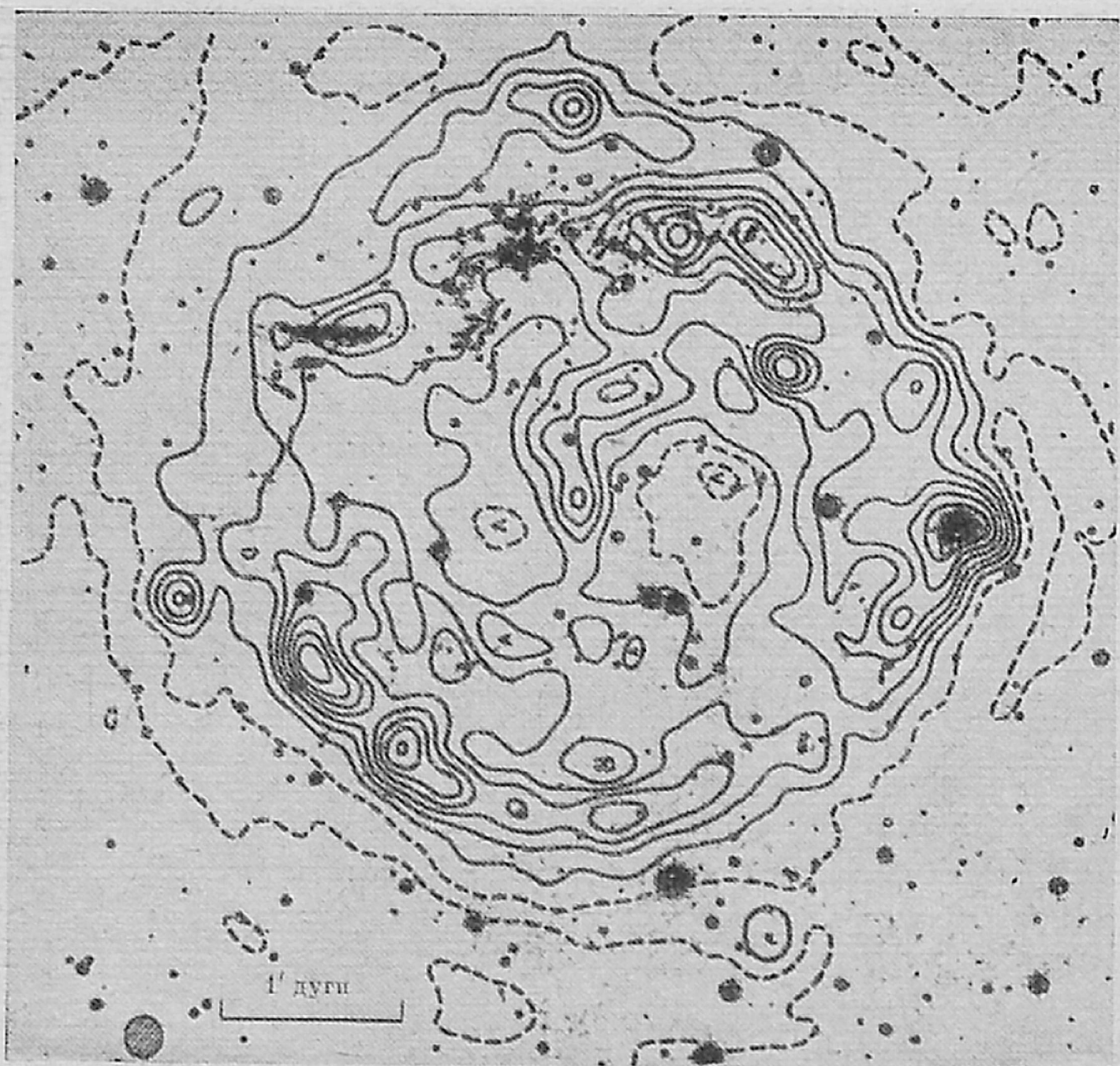


Рис. 29. Фотография Кассиопей-А (негатив)

Видны сгустки и волокна. На снимок наложены горизонталы яркости радиоизображения источника на волне 11 см

стенки, видимые сбоку. На фотографии же эта яркая в радиоизлучении оболочка совсем не видна.

Типичным старым остатком считается система волокнистых туманностей в созвездии Лебедя, тоже показывающая характерное для подобных объектов радиоизлучение и оболочечную структуру (рис. 30). Известно еще несколько объектов, имеющих волокнистую структуру на снимках и оболочечную — в радиоизлучении (табл. 16). Но большинство старых остатков не имеет следов туманностей, и их удастся опознать только по типичному для остатков сверхновых радиоизлучению. Сейчас число радиоисточников, являющихся возможными остатками сверхновых, перевалило за сотню. Более 20 остатков сверхновых найдено в соседней неправильной галактике — Большом Магеллановом Облаке,



Рис. 30. Волокнистая туманность в Лебеде. Ее угловые размеры около
3 градусов дуги

Таблица 16

НЕКОТОРЫЕ ИЗВЕСТНЫЕ ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ

Название остатка или сверхновой	Структура, вид остатка сверхновой		Расстояние, кпс	Диаметр остатка, пс	Возраст остатка к 1974 г., годы	Средняя скорость расширения к 1974 г., км/сек
	на фотографии	по радионаблюдениям				
Крабовидная туманность	См. рис. 27—28	Сердцевидная	1,7	1,6	920	1100
Кассиопей-А	См. рис. 29	Оболочечная	2,7	3,4	308	7500
Сверхновая Тихо	Несколько волокон	»	5	3,5	402	13000
Сверхновая Кеплера	» »	»	7	4,6	370	12000
Парус-Х	Волокнистая туманность	»	0,5	29	50000	Не измерена
Волокнистая туманность в Лебедь	См. рис. 30	»	0,77	30	70000	80
Корма	Волокнистая туманность	»	2	20	20000	85
Волокнистая туманность в Близнецах	То же	»	1,7	20	25000	65

Мы уже говорили о расширении остатков сверхновых. Оно измерено непосредственно только у нескольких объектов. Например, только у трех упомянутых выше типичных остатков — Крабовидной туманности, Кассиопей-А и волокнистой туманности в Лебедь — пока удалось измерить расширение объектов не только по лучевым скоростям волокон, но и по систематическому перемещению этих деталей во все стороны на фотографиях, полученных в разные годы. Как можно видеть из данных табл. 16, весьма высокую скорость расширения имеет Кассиопей-А. Крабовидная туманность, несмотря на свою относительно молодость, имеет умеренную скорость расширения, а у старых остатков она вообще невелика. Нужно отметить, что в Кассиопее-А есть сгустки, не участвующие в быстром расширении.

Знакомая с новыми звездами, мы отмечали, что по измерениям видимого расширения и лучевой скорости разлета материала оболочки можно надежно находить расстояние до объекта. Этим путем найдены расстояния и для трех наиболее исследованных остатков сверхновых. В случае Кассиопей-А и волокнистой туманности в Лебедь оболочка по форме близка к сферической. Не так получается в случае Крабовидной туманности, которая на снимках и в радиоизлучении имеет эллиптическую форму.

По направлениям перемещений волокон на снимках, полученных в разные эпохи, можно пойти точку разлета, т. е. место, где находилась звезда в момент взрыва. Если расстояние, пройденное волокнами от точки разлета, разделить на их скорости, то получим время, прошедшее с начала разлета, если расширение оболочки шло равномерно. Но в случае Крабовидной туманности обнаружилось неожиданное расхождение: по скорости разлета волокон датой начала разлета получается 1140 г. вместо 1054 г.! Это свидетельствует о том, что туман-

ность расширяется с ускорением. Величина ускорения выглядит небольшой: всего $0,01—0,02$ см/сек². Причину возникновения ускорения в свое время указал С. Б. Пикельнер: это воздействие на вещество туманности магнитного поля и космических лучей. С открытием звездного остатка в туманности стало понятным, откуда возникают это магнитное поле и космические лучи.

А имеют ли ускорение волокна в Кассиопее-А? По анализу расширения системы ее волокон начало разлета приходится на 1667 г. с неуверенностью порядка 8 лет. В эти годы европейские астрономы уже обладали телескопами, но не видели никакой вспышки в не заходящем для наших широт созвездии Кассиопеи. Обычно это объясняют высоким межзвездным поглощением в направлении этой сверхновой. Приводился, например, такой довод: в спектрах газовой детали Кассиопей-А, состоящей только из ярких линий без непрерывного спектра, нет ярких ультрафиолетовых запрещенных линий ионизованного кислорода или они очень слабы, потому что сильное межзвездное поглощение в первую очередь «съедает» излучение в ультрафиолетовой области спектра.

С другой стороны, как мы уже говорили, стали известны корейские астрономические записи XVI в., в которых говорится, что в 1592 г. была вспышка, приходящаяся на созвездие Кассиопеи. Поэтому П. Броше и исследова-

тели старинных астрономических записей Дальнего Востока теперь полагают, что это и была вспышка, после которой осталась Кассиопея-А. Место вспышки, конечно, известно очень приблизительно, а разница в датах начала разлета около 70 лет. Если это была действительно вспышка Кассиопеи-А, то ускорение разлета ее волокон должно быть намного выше, чем в случае Крабовидной туманности. Большинство астрономов, однако, сомневается, что корейцы видели вспышку именно Кассиопеи-А.

Физические условия в остатках сверхновых

Кое-какую информацию об условиях в сверхновых дает изучение внешнего вида остатка, обнаружение его расширения и структуры радиоизлучающей области в нем. Но главные сведения о них приносит анализ излучения. С этой целью исследуются спектры газовых сгустков, радиоизлучение остатков по мощности и по характеру спектра, а также рентгеновское излучение. И в конце концов они все вместе обрисовывают нам какую-то картину физических условий в типичном остатке сверхновой.

Спектры волокон и сгустков, встречающихся в остатках сверхновых, состоят из ярких линий водорода и ряда запыщенных линий, типичных для горячих газовых туманностей и оболочек новых звезд. Но если в центре обычной газовой туманности находится заметная очень горячая звезда, а в случае новой звезды, вероятнее всего, — тесная двойная звезда, то в центре остатка сверхновой долгое время не находили звезды, которая была бы способна поддерживать свечение этой туманности, и только недавно стало известно, что в центрах двух остатков сверхновых находятся объекты необычной природы — ультракарликовые нейтронные звезды, поддерживающие температуру и необычный по характеру режим излучения в остатках сверхновых.

В тех случаях, когда в оболочке остатка имеются клочки светящегося газа, можно получить и изучить спектры этих газовых сгустков. В остальных случаях, судя по радиоизлучению, можно лишь заключить, что оболочка наполнена горячим ионизованным газом, или, как его еще называют астрофизики, плазмой.

По аналогии с газовыми туманностями и новыми звездами по яркости линий в спектрах газовых сгустков

можно выяснить конкретные условия, в каких эти линии возникали. Так же как в спектрах новых звезд, здесь встречаются два рода линий. Одни чувствительны к изменению электронной температуры в газовом волокне и служат поэтому для определения температуры, а другие чувствительны к изменению электронной концентрации и дают возможность ее оценить (в разных волокнах одного и того же остатка она может иметь от 3000 до 300 электронов на 1 см^3).

Однако с установлением электронной температуры волокон дело не так просто. Одни линии в их спектрах указывают температуру около $50\,000^\circ$, а другие — только $15\,000^\circ$. Оказалось, что в волокне почти рядом существуют два температурных слоя: разреженный горячий и плотный холодный, а между ними — резкий переход. Почему это так, было объяснено С. Б. Пикельнером. По газовой оболочке сверхновой из места взрыва движутся волны сжатия. Нам более знакома их разновидность — звуковые волны, но волны сжатия в сверхновой отличаются тем, что их скорость выше возможной в этой газовой среде для звуковых волн. Такие волны со скоростями, превышающими скорость звука, называют ударными.

В месте газа, через которое прошла ударная волна, повышается его температура (энергия движения волны сжимает газ и превращается в тепловую). Высокая тепловая энергия ударной волны в месте ее прохождения вызывает свечение газа. Сначала газ нагревается до высокой температуры, а потом постепенно остывает и сжимается. Поэтому основное излучение идет из слоя с температурой $15\,000$ — $30\,000^\circ$. А ионизация элементов, дающая запрещенные линии, происходит в тонком слое горячего газа за фронтом (границей) ударной волны.

Предметом особых забот астрофизиков является выяснение химического состава газа в остатках сверхновых. В волокнах Крабовидной туманности Л. Волтье (Нидерланды) обнаружил двух-трехкратный избыток гелия по сравнению с его содержанием в обычном межзвездном газе, а ван ден Берг вместе с мексиканским астрономом М. Пеймбертом нашли в Кассиопее-А, в ее медленно движущихся газовых сгустках избыток азота, а в быстро движущихся волокнах — семикратный избыток кислорода и аргона.

Если бы газ в сгустках и волокнах остатков сверхновых был бы просто межзвездным газом, который обжат продуктами взрыва сверхновой, то его химический состав не был бы таким странным. Зато если этот газ был выброшен из сверхновой и является частью продуктов ее взрыва, то избыток некоторых химических элементов в таком газе вполне понятен с точки зрения звездной эволюции, завершённой звездой перед взрывом. Следует все же заметить, что изучение химического состава вещества волокон и сгустков началось совсем недавно и предстоит еще во многом разобраться, прежде чем сделать окончательные выводы.

Самой характерной особенностью остатков сверхновых является, пожалуй, их радиоизлучение. Как мы уже знаем, новые звезды имеют слабое радиоизлучение, связанное с высокой температурой их оболочек при вспышках. Остатки же сверхновых принадлежат к числу сильнейших радиоисточников нашей Галактики, если не считать, конечно, самого ядра Галактики. Принципиальной особенностью радиоизлучения остатков является то, что оно не имеет теплового характера, т. е. его интенсивность систематически возрастает с длиной волны.

Объяснение нетепловому радиоизлучению остатков сверхновых было дано И. С. Шкловским. В остатке, указывал он, должно быть сильное магнитное поле запутанного характера, удерживающее выработанные сверхновой космические лучи. По традиции космическими лучами принято называть не электромагнитное излучение, а электроны, позитроны и атомные ядра и их осколки, имеющие скорости движения, близкие к световой, и, следовательно, огромные кинетические энергии. Такие частицы еще называются релятивистскими. Как мы уже говорили в главе II, эти релятивистские частицы движутся по спирали, обвивающей силовые линии магнитного поля, и излучают электромагнитную энергию узким пучком лучей по направлению своего движения. Излучение такого характера мы называли синхротронным. Хотя большую часть космических лучей высокой энергии составляют атомные ядра, их синхротронное излучение незначительно, главная роль в синхротронном излучении принадлежит позитронам и электронам. Чем больше энергия частиц, тем короче длина волны излучения. Число электронов падает с ростом их энергии, поэтому в спектре синхротронного

излучения интенсивнее область, где излучают релятивистские электроны с умеренными и малыми энергиями, т. е. в длинноволновой части спектра. Этим объясняется возрастание с длиной волны интенсивности в спектре синхротронного излучения.

И. С. Шкловский пришел к выводу, что непрерывный оптический спектр, наблюдаемый у Крабовидной туманности, создается более энергичными релятивистскими электронами, т. е. имеет тоже магнитно-тормозную природу. Если это так, то излучение Крабовидной туманности было бы поляризованным, т. е. в известной степени «причесанным» — упорядоченным по направлению колебаний световых волн. На эту возможность указывал харьковский астрофизик И. М. Гордон в 1954 г. В том же году поляризация света Крабовидной туманности была обнаружена В. А. Домбровским и М. А. Вашакидзе. Но радиоизлучение Крабовидной туманности оказалось поляризованным только в центральной части. И. С. Шкловский предполагает, что это связано с сильной запутанностью магнитного поля во внешних частях туманности. Открытие поляризации излучения Крабовидной туманности полностью подтвердило синхротронный характер ее непрерывного оптического и радиоволнового излучений.

В самом центре Крабовидной туманности, как мы увидим далее, обнаружены еще два удивительных источника радиоизлучения. Один из них — пульсар, а другой — радиоисточник размерами 0,001 пс. Имеются предположения, что этот компактный радиоисточник — рассеянное излучение пульсара в ближайших к нему окрестностях туманности.

Мы познакомились с видимым и радиоволновым излучениями. Кроме них в остатках сверхновых обнаружено чрезвычайно коротковолновое излучение, называемое рентгеновским и гамма-излучением. Собственно рентгеновским излучением является излучение с длинами волн от 900 до 0,13 Å, а более короткое — гамма-излучением. Но чаще для описания этих излучений используют энергетические единицы — килоэлектронвольты (кэв), мегаэлектронвольты (1 Мэв = 1000 кэв) и т. д. Между длинами волн излучения λ и энергиями фотонов E имеется простое соотношение: $E \cdot \lambda = 12,396 \text{ кэв} \cdot \text{Å}$. Таким образом, рентгеновская область заключена между 0,01 кэв и 100 кэв, а излучение с фотонами более высокой энергии относится к гамма-области.

Рентгеновское и гамма-излучения могут быть, как и оптические, тепловыми (что соответствует температурам плазмы в миллионы градусов) и нетепловыми (например, синхротронными).

Рентгеновское излучение остатков сверхновых было открыто с помощью ракетных экспериментов в 1962 г., когда самый сильный из рентгеновских источников был обнаружен в направлении Крабовидной туманности.

Ракетные и аэростатные эксперименты позволили изучить спектр этого самого сильного рентгеновского источника в области от 1 кэв и до 150 Мэв, а далее интенсивность источника уже была ниже предела чувствительности современной аппаратуры. Рентгеновское излучение в области 1—10 кэв обнаружено и у Кассиопеи-А, а также у молодого остатка сверхновой Тихо Браге. В 1970 г. было обнаружено мягкое рентгеновское излучение (так называется излучение в области 1—2 кэв, примыкающей к ультрафиолетовому излучению) от близкого к нам старого остатка — волокнистой туманности в Лебеде, а позже и от ряда других остатков сверхновых. Характер рентгеновского излучения в этих случаях соответствует тепловому излучению плазмы, находящейся внутри туманности, когда она имеет температуру до 4 млн. градусов непосредственно за фронтом ударной волны. Подобное рентгеновское излучение недавно найдено у остатков Парус-Х и Корма-А.

В 1964 г. И. С. Шкловский пришел к заключению, что в остатках сверхновых на поздних стадиях могут существовать условия для излучения линий, расположенных в рентгеновской области спектра. При температуре в 4 млн. градусов очень заметное излучение будет давать линия водородоподобного иона кислорода, имеющего возле ядра только один электрон. Ее длина волны 19 Å. Последние исследования рентгеновского излучения волокнистой туманности в Лебеде блестяще подтвердили это интересное предсказание.

Эволюция остатка оболочки сверхновой

В ранний период расширения оболочки сверхновой разлет ее вещества происходит с равномерной скоростью, как говорят инерционно. Хотя некоторое количество энергии на протяжении всей дальнейшей эволюции оболочки

в нее непрерывно поступает из пульсара, а известная доля энергии расходуется ею на излучение, эти потери и поступления невелики по сравнению с энергией, сообщенной оболочке при взрыве. Другими словами, несколько десятков тысяч лет оболочка сверхновой движется по законам расширения материала при сильном взрыве (рис. 31).

В физике процесс расширения или сжатия газа, в котором используется аккумулированная им энергия без существенных пополнений или потерь, называется адиабатическим.

Закономерности адиабатического процесса газа особенно просты, и это облегчило изучение эволюции оболочек сверхновых.

Но по мере расширения остатка оболочки сверхновой начинает сказываться влияние разреженного межзвездного газа. Масса оболочки увлекает встречающийся межзвездный газ, делясь с ним своей кинетической энергией, другими словами, сообщая ему скорость, и в конечном счете тормозится сама. Расширение оболочки идет с высокой скоростью, превышающей скорость звука, следовательно, ее сопровождает ударная волна. За ударной волной, как мы знаем, остается область высоконагретой плазмы, которая сравнительно медленно остывает за счет излучения в рентгеновской и ультрафиолетовой областях спектра.

Когда температура плазмы в оболочке сверхновой снижается до нескольких миллионов градусов, начинает сказываться химическая неоднородность плазмы. Из наиболее распространенных химических элементов — водорода, гелия и кислорода — первым в плазме начинает обзаводиться одним электроном ион кислорода. В излучении атом кислорода с единственным электроном ведет себя во многом аналогично водороду. В частности, как мы уже знаем, на волне $19 \text{ \AA}$ он имеет сильную линию, аналогичную первой лаймановской линии водорода. С момента, когда появляются водородоподобные ионы кислорода и других элементов, начинается большая утечка энергии оболочки на излучение в линии $19 \text{ \AA}$ и ей подобных. Это знаменует конец адиабатической стадии эволюции оболочки.

Подробные расчеты структуры расширяющейся оболочки сверхновой в адиабатической стадии, проведенные

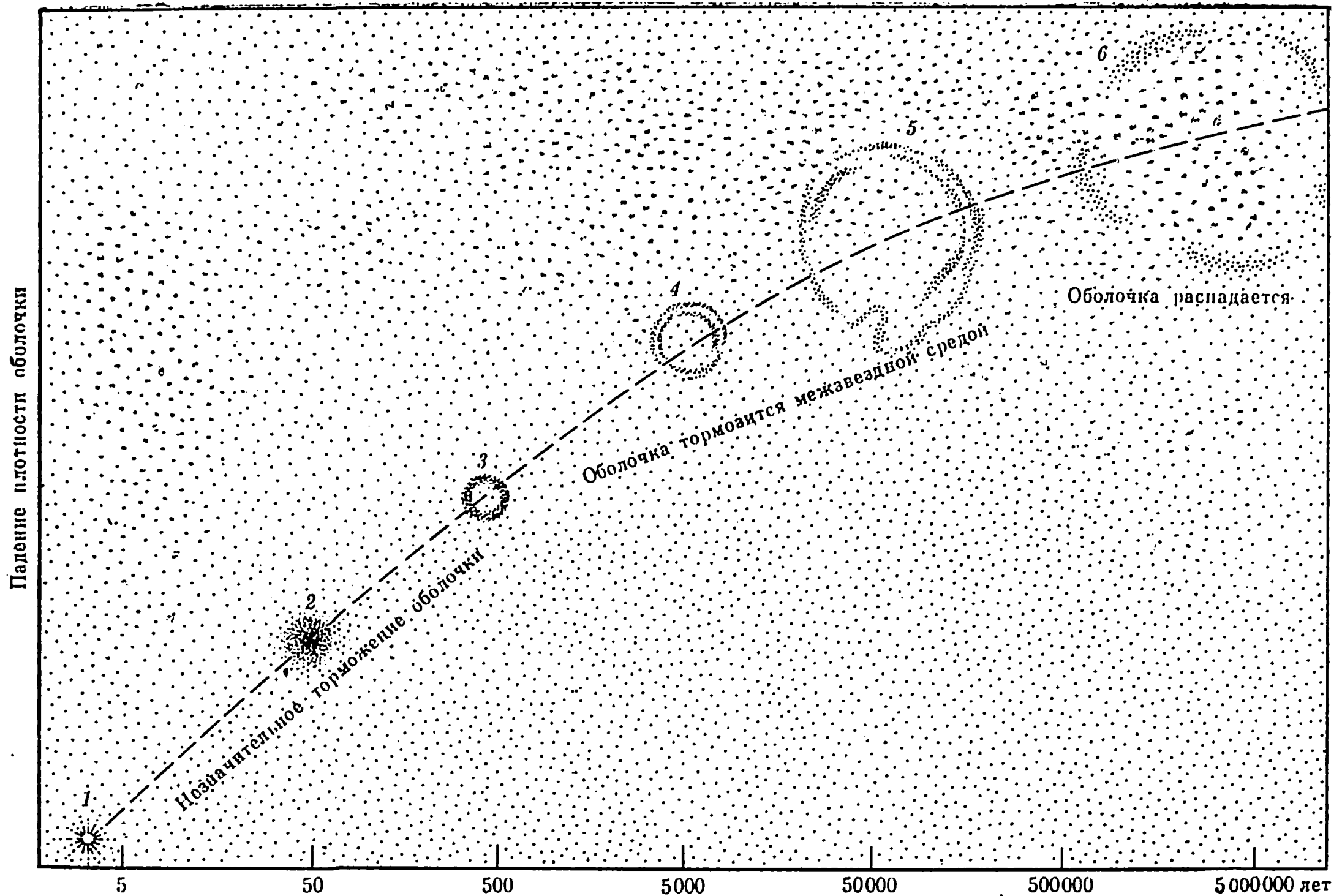


Рис. 31. Схема эволюции остатка оболочки сверхновой в межзвездной среде

1 — вспышка сверхновой, 2 — остаток еще имеет сердцевинную структуру, 3 — остаток приобретает оболочечную структуру (Кассиопея-А), 4 — Парус-Х, 5 — волокнистая туманность в Лебедь, 6 — межзвездные облака

академиком Л. И. Седовым и рядом других исследователей, показали, что она имеет толщину примерно в одну десятую радиуса оболочки, а внутренняя полость заполнена очень горячей разреженной плазмой, оптически незаметной, но активной в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра.

А как эволюционирует радиоизлучение оболочки сверхновой? Мы уже знаем, что оболочка сверхновой имеет запутанное магнитное поле, которое удерживает образовавшиеся в сверхновой космические лучи. Последние, представляя собой релятивистские заряженные частицы, испускают в магнитном поле известное нам синхротронное излучение. По теории радиоизлучения остатков сверхновых, разработанной И. С. Шкловским, все релятивистские частицы в остатке уменьшают со временем в одинаковом отношении энергию. В таком случае, предполагая неизменными полное число релятивистских частиц и полное число магнитных силовых линий оболочки, можно найти закон изменения интенсивности радиоизлучения в зависимости от радиуса расширяющейся оболочки или от ее возраста, если ее расширение еще не заторможено межзвездной средой. Эта закономерность полностью подтвердилась наблюдениями радиоизлучения остатков сверхновых.

Важным подтверждением теории Шкловского было обнаружение предсказанного ею систематического ослабления потока радиоизлучения от молодых остатков сверхновых. Для Кассиопеи-А теория предсказывала ослабление радиоизлучения на 1,7% в год, а наблюдения дали оценки от 0,85% до 2,24% в прекрасном согласии с предсказанием. Для Крабовидной туманности потери излучения предполагались всего в 0,3% в год, а предварительные наблюдения дают 0,47% с высокой неуверенностью около 0,38%.

И. С. Шкловский на основании своей теории дал формулы для оценок расстояний до старых остатков сверхновых по видимым угловым размерам и яркости их радиоизлучения. Благодаря этому почти для любого остатка сверхновой можно находить расстояние.

Труднейшей задачей является оценка возраста старых остатков сверхновых. Непосредственно по низкой скорости расширения волокнистой туманности в Лебеде, наблюдаемой в наше время, можно оценить максимальный

возраст, полагая, что ее начальная скорость расширения была такой же, как у Кассиопей-А. Исходя из таких предположений, Минковский нашел возраст туманности: 150 тыс. лет. С другой стороны, наименьший возможный возраст этого объекта оценивается им в 45 тыс. лет. По теории И. С. Шкловского, возраст туманности получился около 70 тыс лет. Как видим, даже для этой туманности оценки возраста получаются довольно разные.

Итак, остаток сверхновой расходует доставшуюся ему энергию взрыва на расширение и торможение в межзвездной среде, на свечение и радиоизлучение. Но без пополнения энергии от мощного источника здесь все же не обойтись. Расход энергии у молодых остатков сверхновых оказывается так велик, что для ее пополнения нужна постоянная инъекция — приток энергии.

В обычных горячих газовых туманностях источником энергии является центральная звезда, снабжающая туманность ультрафиолетовыми квантами. Такой горячей звезды в молодых остатках сверхновых нет. Но в центре ближайшего молодого остатка сверхновой — Крабовидной туманности — находится слабая звездочка 16-й величины. Если она является обыкновенной звездой, скажем звездой главной последовательности, то ее энергии мало для поддержания свечения туманности. Кроме того, откуда в туманности появляются релятивистские электроны, мощное рентгеновское излучение в центре? Все это указывает, что центральная звездочка в туманности не является обычной, а имеет совершенно удивительные свойства. Она должна быть, судя по ее слабой звездной величине, карликовой, но очень богатой энергией.

Но существуют ли в природе такие объекты? Ведь свойства, которые астрономы приписывали центральной звезде Крабовидной туманности, — всего лишь предсказание, требующее доказательств на независимых объектах, а в других же молодых остатках сверхновых никаких подозрительных центральных звезд не обнаружено. И все же доказательства были получены. Об этом — в следующей главе.

ПУЛЬСАРЫ — ЕЩЕ ОДИН СОРТ РЕЛИКТОВ СВЕРХНОВЫХ

Пульсирующие радиоисточники

В наше время астрофизика приносит сенсационных открытий больше, чем какая-либо другая наука, изучающая природу. Так, радиоастрономия только в последнем десятилетии обнаружила квазары и космические «мазеры», начальное тепловое излучение Метагалактики и пульсары. Родившаяся в этом же десятилетии рентгеновская астрономия открыла сильные галактические источники рентгеновского излучения и среди них — рентгеновские пульсары.

История открытия пульсаров весьма увлекательна. Дело в том, что к моменту их обнаружения радиоастрономия уже более десяти лет располагала мощными радиотелескопами, способными наблюдать радиоисточники с быстрыми колебаниями интенсивности (секунды и доли секунд), но радиоастрономам не верилось в реальность существования быстро пульсирующих радиоисточников. Ведь чтобы радиоисточник производил такие быстрые колебания радиоизлучения, он должен иметь очень малые размеры, такие, например, как наша планета. Но радиоизлучающих космических объектов такого размера астрономия не знала.

Конечно, радиоизлучение от далеких и поэтому малых по видимым угловым размерам радиоисточников (квазаров) испытывало небольшие беспорядочные колебания продолжительностью в секунды и их доли. Это явление обнаружено еще в 1964 г. и названо мерцанием радиоисточников. Причина мерцаний была установлена: прохождение радиоволн от удаленного радиоисточника через облака межпланетного газа (плазму). Изучение этих мерцаний представляло некоторый интерес для радиоастрономии: по их характеру можно было вычислять угловые размеры квазаров.

С точки зрения радиоастрономии это была одна из многих наблюдательных задач, имевших целью сбор сведений о квазарах, представлявших собой объекты неясной природы. Поэтому для исследования межпланетных мерцаний в Кембридже (Англия) на Маллардской радиообсерватории был построен в 1967 г. радиотелескоп, который не выделялся среди существующих ни размерами антенны, ни спецификой в длинах волн, а имел только очень высокую чувствительность на своей волне приема (3,7 м) и приспособление для быстрой записи принимаемого радиосигнала.

Маллардская установка под руководством профессора А. Хьюиша стала получать хороший материал о мерцаниях удаленных радиоисточников, и среди них в августе того же года был обнаружен один довольно странный слабый радиосигнал. Сотрудница обсерватории мисс С. Белл, изучавшая эти записи, первоначально сочла его случайной помехой. Но тот же странный сигнал настойчиво продолжал появляться в записях и в конце концов заинтересовал радиоастрономов. Длительность радиосигнала (или его «пульс») оказалась всего треть секунды, но через период точно в 1,33 секунды или же через несколько таких периодов (иногда «корреспондент» молчал по нескольку минут) снова появлялся слабый радиосигнал. Сила сигнала от случая к случаю колебалась, но настораживало строгое соблюдение длины периода (рис. 32).

Вполне естественно встал вопрос: не сигналы ли это от какого-нибудь искусственного объекта, например далекой космической ракеты в нашей Солнечной системе? Но радиоисточник не показал никаких следов перемещения по небу. Его параллакс оказался незначительным, следовательно, объект довольно далеким. Но если это естественный радиоисточник, то, судя по его короткому пульсу, он должен иметь размеры не большой планеты! Нужно было спокойно разобраться в явлении и не спешить с сенсационными пресс-конференциями. Пять радиоастрономов, принимавших участие в исследованиях, засекретили свое открытие и не сообщали о нем в печать, пока не выяснили естественную природу этого явления. В общении между собой они полусерьезно называли его — «эти маленькие зеленые человечки».

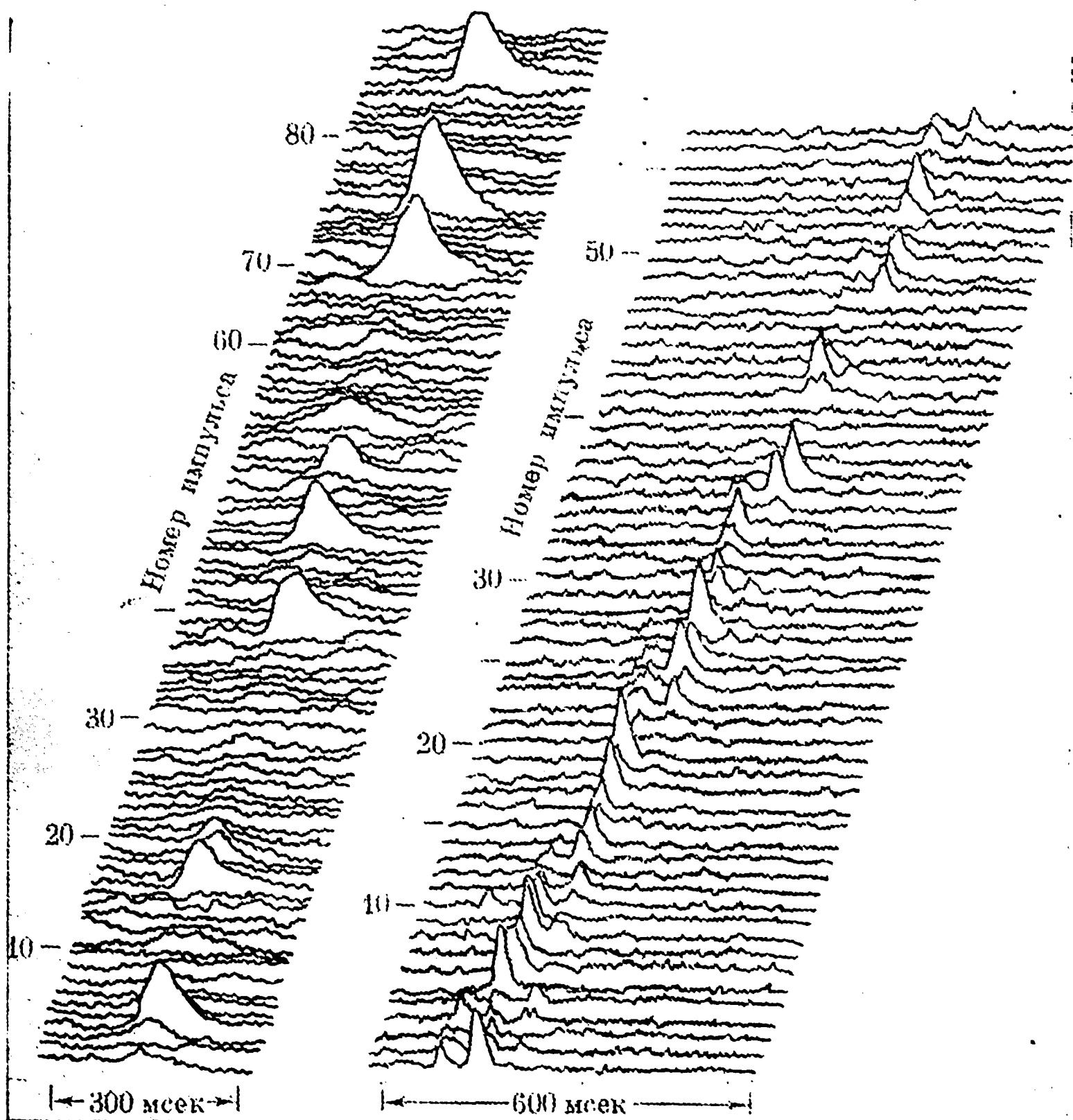


Рис. 32. Несколько последовательных записей импульсов радионизлучения пульсара CP 0808 («кривые блеска»), полученных на радиоастрономической станции Физического института Академии наук СССР в Пушчино. Каждый всплеск радионизлучения своеобразен, некоторые всплески сильны, другие — очень слабы

Не сигналы ли это разумных существ с других планетных систем? Однако записи радиосигналов не показали никакого разумного кода и следов какой-либо искусственной информации. Но не исключено, что это просто случайные сигналы с населенной разумными существами планеты. Вспомним, например, подсчеты И. С. Шкловского в его книге «Вселенная, жизнь, разум»: наша Земля излучает во Вселенную довольно

значительный поток радиоизлучения вследствие непрерывной работы многочисленных радиостанций, телепередатчиков, естественных и искусственных электрических разрядов в атмосфере и на поверхности планеты. Может быть, и там, откуда идет пульсирующее радиоизлучение, происходит подобное?

Но если сигналы идут с какой-нибудь планеты, обращающейся по орбите вокруг центральной звезды, в периоде радиопульсаций должна сказываться скорость движения планеты по орбите, как сказывается и скорость движения Земли. Период пульсаций первого радиоисточника был измерен до десятиmillionной доли секунды, но, кроме влияния орбитальной скорости Земли, никакой «собственной» орбитальной скорости радиоисточник не обнаружил. Нет, это не было радиоизлучением планеты, подобной Земле.

Кембриджские радиоастрономы вскоре нашли еще три пульсирующих радиоисточника, и окончательно стало ясно, что обнаружено новое явление природы, названное ими пульсарами.

Объектами, которые имеют очень короткий период изменений, по представлению астрофизиков, могли быть тесные двойные звезды (в этом случае период пульсара — это период обращения радиоизлучающей компоненты по орбите), либо белые карлики, у которых предполагается быстрая пульсация излучающей поверхности. Но до открытия пульсаров ни у тех ни у других объектов не наблюдали да и не предполагали никакого значительного радиоизлучения. Кроме них пульсарами могли оказаться никогда еще не обнаруживавшиеся, но тем не менее давно предсказанные и разыскиваемые почти сорок лет нейтронные звезды (предполагаемые продукты эволюции звезд с массами в $1,4—2 M_{\odot}$). В пользу нейтронных звезд говорили явно небольшие размеры пульсаров, но и в теориях нейтронных звезд до открытия пульсаров явление пульсирующих радиоизлучений специально не предусматривалось, и в этом смысле обнаруженное явление пульсаров также было большой неожиданностью.

Открытие пульсаров вызвало широкий интерес у радиоастрономов, и за поиски взялись ведущие радиоастрономические обсерватории мира, обладающие лучшими радиотелескопами: австралийская радиоастрономическая обсер-

ватория в Мологго, пуэртиканская обсерватория в Аресибо, американская Национальная радиоастрономическая обсерватория в Грин Бэнке и радиоастрономическая обсерватория Физического института Академии наук СССР в Пуццино (под Серпуховом).

Сейчас известны уже более ста пульсаров и среди них такие короткопериодические, что не могут быть ни белыми карликами, ни тесными двойными звездами. Были также найдены и теоретические доказательства, что пульсары не могут быть ни теми, ни другими. Объявленный в 1968 г. при их открытии конкурс выиграли нейтронные звезды.

Радиопульсары показывают характер

Большинство пульсаров обнаружено по их радиоизлучению, поэтому они справедливо получили название радиопульсаров. Это — классический тип пульсаров в отличие от тех немногих, у которых обнаружено оптическое или рентгеновское пульсирующие излучения. Хотя больше всего информации о физических свойствах светил дает их оптическое излучение, анализ радиоизлучения, как мы уже видели на примере сверхновых, тоже приносит много ценного. А в случае радиопульсаров приходится основываться пока только на нем.

Важнейшей характеристикой пульсаров является длина периода между пульсациями. Сейчас известны пульсары с периодами от 0,033 сек до 3,746 сек. Рекордно короткий и самый длинный по периодам пульсары случайно обнаружены в одном и том же районе неба.

Строгая периодичность всплесков радиоизлучения пульсаров не исключает медленного изменения их периодов со временем. Для обнаружения изменения нужны долгие и тщательные наблюдения с учетом влияния орбитального движения Земли на величину периода, чтобы исключить годовые колебания пульсации. Сейчас исследовано более 30 пульсаров, и у всех периоды систематически увеличиваются. Другими словами, пульсации со временем замедляются. Следовательно, чем длиннее период, тем старше пульсар. Но в таком случае, если считать прирост периода равномерным в течение всего времени существования пульсара, то, разделив период на скорость его изменения в год, мы найдем грубую оценку его возраста. Она колеблется от 2,5 тыс. до 125 млн. лет (табл. 17).

Таблица 17

НЕСКОЛЬКО ИНТЕРЕСНЫХ ПУЛЬСАРОВ

Наименование	Период пульса- ции, сек	Длитель- ность всплеска, сек	Мера дисперсии, пс/см ³	Расстоя- ние, пс	Возраста- ние периода, миллион- ные сек/год	Возраст, годы	Видимая звездная величина	Примечание
MP0031—07	0,943	0,051	10,9	210	0,0134	30 млн.	—	Ближний пульсар
NP0525+21	3,745	0,181	50,8	2000	1,26	1,5 млн.	—	Пульсар с самым длинным периодом
NP0531+21	0,033	0,003	56,8	2000	13,35	918	17	Оптический пульсар в Крабовидной туманности с кратчайшим периодом
PSR0611+22	0,335	0,006	96,7	1500	1,77	90 тыс.	—	Связан с остатком IC443
CP0808+74	1,292	0,041	5,8	190	0,005	125 млн.	Слабее 21	Старейший пульсар, один из первых открытых, ближайший к нам
PSR0833—45	0,089	0,002	63	500	3,95	11 тыс.	» 24	Пульсар внутри Паруса-X
CP0834+06	1,274	0,024	12,9	430	0,21	3 млн.	» 21	Один из первых открытых
CP0950+08	0,253	0,009	3,0	290	0,0072	18 млн.	» 24	То же
PP0943+10	1,098	0,024	15,4	300	—	—	—	Открыт советскими радиоастрономами
CP1133+16	1,188	0,028	4,8	210	0,118	5 млн.	Слабее 24	Один из первых открытых
MP1449—65	0,180	0,005	90	1700	—	—	—	Пульсар с коротким периодом
IP1858+03	0,655	0,120	402	—	—	—	—	Наибольшая мера дисперсии
CP1919+21	1,337	0,031	12,5	420	0,042	16 млн.	Слабее 25	Обнаружен в слабом оболочечном радионисточнике
AP2016+28	0,558	0,014	14,2	470	0,0047	60 млн.	» 25	Старый по возрасту пульсар

Однако быстрые изменения периода характерны только для пульсаров с самыми короткими периодами, что наводит на мысль об убывании скорости изменения периода со временем, поэтому реальные возрасты пульсаров должны быть меньше.

К счастью, два самых молодых короткопериодических пульсара оказались внутри известных сверхновых (Парус-Х и Крабовидная туманность), их возраст можно вычислить и другим способом. Оказалось, что реальный возраст пульсара в Крабовидной туманности более чем в два раза меньше расчетного. Но и этим еще не ограничиваются особенности названных пульсаров. В 1969 г. оба они испытали скачкообразное уменьшение периода. У пульсара Парус-Х период уменьшился на 196 миллиардных доли секунды, после чего он как ни в чем не бывало снова стал систематически расти, а пульсар в Крабовидной туманности уменьшил период на 77 триллионных доли секунды. Этот пульсар единственный, наблюдаемый оптическими средствами, и мы позднее познакомимся с ним подробно.

Записи изменения интенсивности радиоизлучения пульсара — это своего рода кривые блеска его радиопеременности. Их изучение обнаруживает много общих для всех пульсаров черт и много индивидуальных особенностей. Длительность всплеска радиоизлучения (его называют также импульсом) составляет приблизительно 5% длины периода пульсара.

Некоторые пульсары имеют посередине интервала между главными всплесками еще промежуточный, меньшей силы (интерпульс).

Отдельные всплески радиоизлучения одного и того же пульсара крайне непостоянны по виду и интенсивности, но объединение их в один средний показывает, что в среднем форма импульса устойчива (рис. 33). Главная причина колебаний силы всплеска — мерцание при прохождении радиоволн через межпланетную и межзвездную плазму. Кроме того, на каждый всплеск налагается мелкая рябь — подимпульсы (рис. 32) с длительностью в десятитысячные доли секунды. Особенно сильна неравномерность всплесков у пульсара RR0943, открытого на радиоастрономической станции Физического института им. П. Н. Лебедева. Он дает всего 3—4 сильных импульса в месяц при периодичности слабых в 1,098 сек!

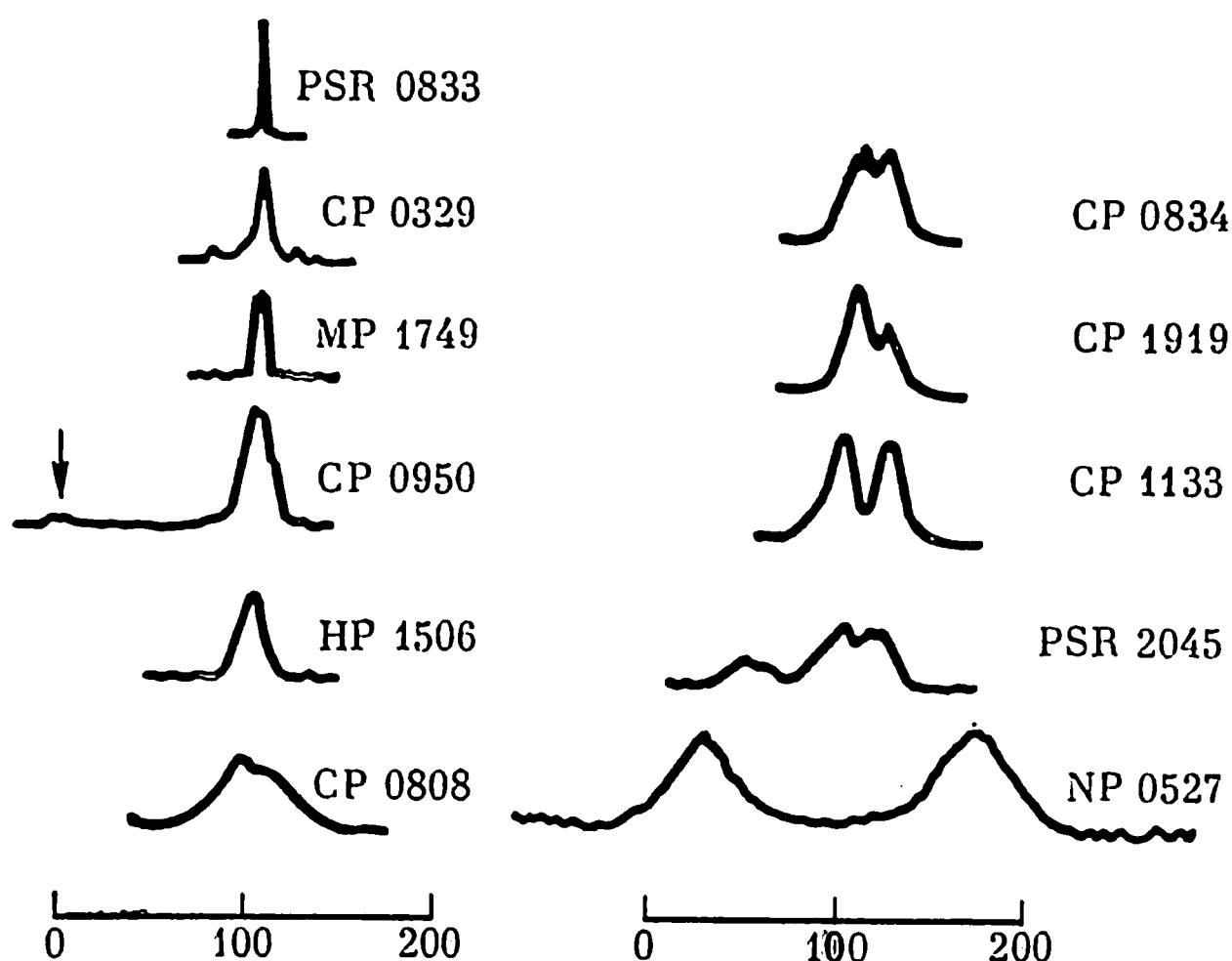


Рис. 33. Несколько типичных форм средних по многим записям всплесков радионизлучения пульсаров

Указаны наименования пульсаров, стрелкой отмечен интерпульс. По горизонтальной оси отложены миллионные доли секунд.

Подымпульсы — самые короткие из известных нам периодических колебаний, имеющих самостоятельную периодичность. Они то усиливают, то ослабляют интенсивность отдельных импульсов. Естественно, что размеры пульсирующей области должны быть не больше, чем расстояние, проходимое радиоволной в течение подымпульса, т. е. около 30 км. Это и свидетельствует о скромных размерах светила, ответственного за пульсацию.

Хотя период пульсации на всех длинах волн одинаков, наблюдения показывают, что моменты всплесков на более длинных волнах наблюдаются позже. Величина запаздывания зависит от количества электронов межзвездной плазмы, находящихся на пути от пульсаров до наблюдателя. Эту величину, легко вычисляемую по наблюдениям запаздывания импульсов пульсара на разных длинах волн, принято называть мерой дисперсии.

Если бы межзвездная плазма в Галактике была размещена равномерно, то, разделив меру дисперсии на концентрацию электронов, мы получили бы оценку расстояния до пульсара (рис. 34). Но межзвездная среда неод-

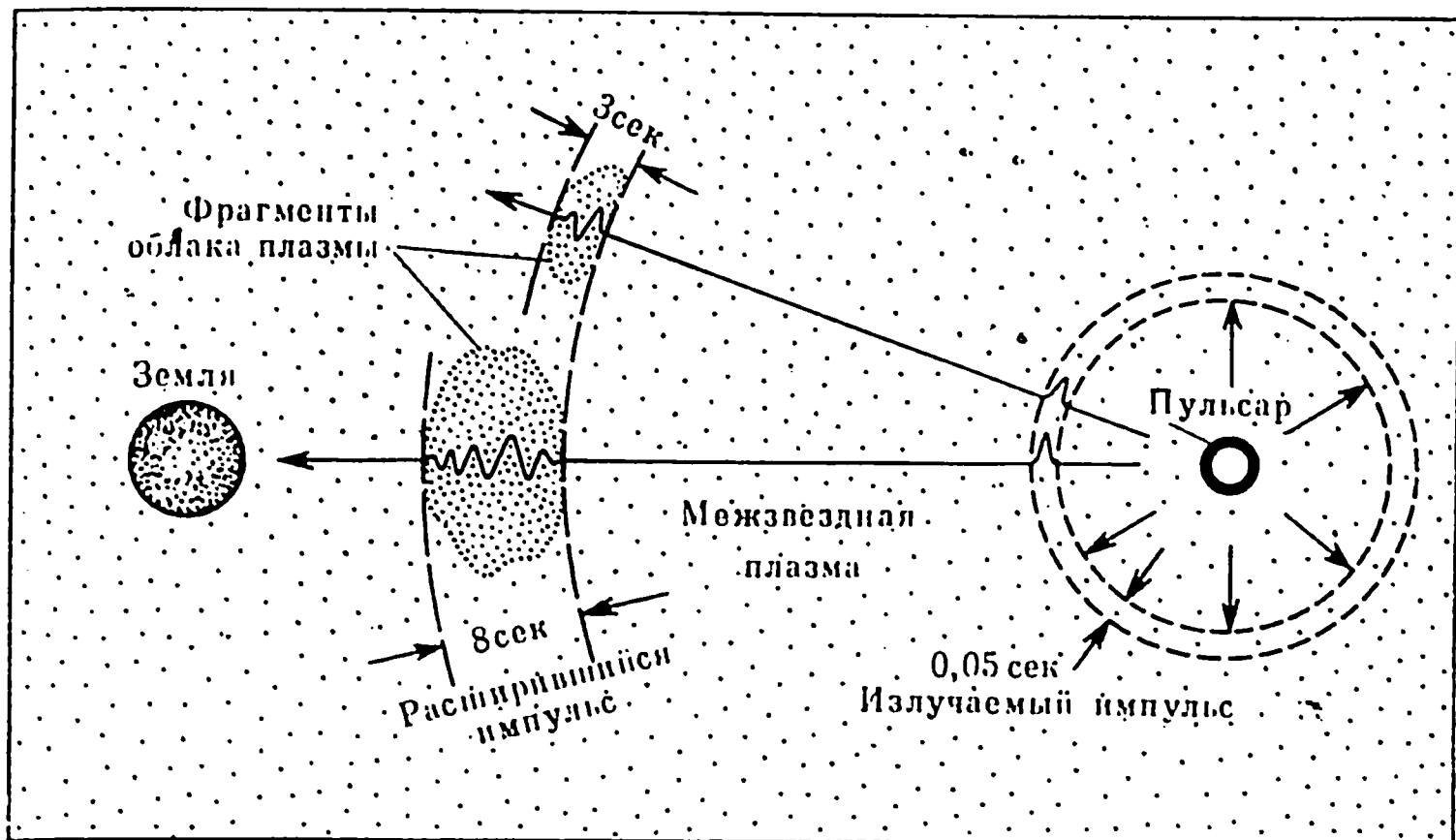


Рис. 34. Прохождение короткого радиопульса от пульсара через межзвездную среду

Попадая в облако межзвездной плазмы, обладающее повышенной концентрацией электронов, импульс испытывает дисперсию радиоволн и расплывается. Плазму быстрее преодолевают длинноволновые колебания, чем коротковолновые

нородна: газ в ней собран в облака, а возле горячих звезд есть области сильно ионизованного газа с высокой концентрацией электронов. Полагая среднюю концентрацию электронов в межзвездной среде равной $0,03$ электрона на 1 см^3 , можно грубо находить расстояние до тех пульсаров, которые находятся внутри галактического диска и излучение которых при следовании до наблюдателя не пересекало областей сильно ионизованного газа. Но если пульсар находится за пределами галактического диска, то по мере дисперсии можно найти лишь часть расстояния, пройденного его сигналом в галактическом диске, где присутствуют свободные электроны, а часть, пройденная вне диска, где концентрация электронов ничтожна, останется неизвестной.

В редких случаях расстояния до пульсаров можно оценить и другими способами. Так, расстояния до пульсаров, находящихся внутри остатков сверхновых, могут быть найдены по способам, применяемым для отыскания расстояний до этих остатков. Излучение далеких пульсаров, расположенных в области нашей Галактики, в своем сле-

довании к Земле пересекает спиральные рукава. Холодный водород, сконцентрированный в них, поглощает излучение пульсара на волне 21 см. Вследствие галактического вращения поглощение, создаваемое в каждом спиральном рукаве, будет по длине волны немного отличаться от поглощения в другом рукаве. Поэтому удастся расшифровать, какие рукава пересек сигнал от пульсара и где на схеме Галактики он должен находиться. Но пока было надежно обнаружено только поглощение радиоизлучения у двух пульсаров в ближайшем спиральном рукаве, возле которого находится Солнце.

Оптический и рентгеновский пульсары

Открытие пульсаров первоначально обошло стороной объект, с которого начиналось большинство важных открытий в остатках сверхновых, — хорошо известную нам Крабовидную туманность. Дело изменилось, однако, в 1968 г., когда сначала в остатке сверхновой Парус-Х, а затем в Крабовидной туманности были обнаружены радиопулсары с самыми короткими периодами. В январе 1969 г. район пульсара в Крабовидной туманности был обследован оптическим телескопом с фотоэлектрической аппаратурой, способной регистрировать быстрые колебания блеска. Поиски оказались успешными: было отмечено существование оптического объекта с колебаниями блеска, имеющими такой же период, как и радиопулсар. Через неделю-две этот объект был разыскан на снимках Крабовидной туманности.

Еще в начале века в центре туманности замечена пара звезд 16-й величины. Одна из них имела обычный спектр и, несомненно, случайно находилась на луче зрения земного наблюдателя. Другая же оказалась довольно странной звездой: у нее был какой-то неразборчивый спектр (типа F по показателю цвета, но без характерных линий). В. Бааде, исследуя Крабовидную туманность в 1942 г., обратил на нее внимание как на возможный звездный остаток сверхновой. Обычная звезда с температурой 7000° на поверхности не могла бы поддерживать высокий энергетический режим Крабовидной туманности (хотя в то время еще не было обнаружено даже ее мощное радиоизлучение). И. С. Шкловский, подчеркивая возможную особую природу этой звезды, указал на нее как на источ-

ник релятивистских частиц и фотонов высокой энергии. Однако все это были лишь вполне логичные предположения, нуждавшиеся в независимых наблюдательных подтверждениях. И вот эта звезда оказалась оптическим пульсаром, имеющим одинаковые с радиопулсаром период и интерпульсы.

В прошлом проводились неоднократные специальные измерения положения пары центральных звезд туманности с целью обнаружить их годичное перемещение по небу (собственное движение). Если бы пульсар двигался только поперек луча зрения, то его скорость, судя по собственному движению и расстоянию Крабовидной туманности, была бы около 100 км/сек. Но он имеет еще и скорость вдоль луча зрения — лучевую скорость. К сожалению, из-за отсутствия линий в спектре оптического пульсара ее измерить невозможно. Существует предположение, что звезда, которая в 1054 г. взорвалась как сверхновая, происходит из группы горячих звезд типа О и В, называемой звездной ассоциацией Близнецы-1, пространственно расположенной по соседству с Крабовидной туманностью. В этом случае звезда должна иметь скорость примерно такого же порядка, как и вычисленная по собственному движению. Следовательно, еще до взрыва звезда имела высокую скорость, была так называемым бегуном.

Интересно, что можно рассчитать место, где находился, судя по собственному движению, пульсар в момент взрыва сверхновой. Оказывается, оно неплохо совпадает с точкой разлета вещества Крабовидной туманности. Это прямо свидетельствует о совместном происхождении пульсара и туманности в процессе взрыва звезды.

Естественно, что после открытия одного оптического пульсара были предприняты поиски других в остатках сверхновых и в районах радиопулсаров. Но из 15 радиопулсаров, подвергнутых к 1971 г. тщательным оптическим обследованиям, ни один не оказался оптически наблюдаемым объектом. Так, в Парусе-Х оптический пульсар, по-видимому, слабее предела чувствительности аппаратуры, применявшейся для поисков, — слабее 24-й звездной величины. Это значит, что пульсар в Парусе-Х более чем в четыре тысячи раз слабее по блеску оптического пульсара в Крабовидной туманности. Возможно, что оптический пульсар в Крабовидной туманности не является типичным среди пульсаров, как и сама туманность не счи-

тается типичной среди остатков сверхновых звезд. Но не исключено, что оптические пульсации в других радиопульсарах невелики по величине и звездный остаток скрывается среди слабых звезд, подвергавшихся обследованию. В этом случае придется изменять процедуру поисков.

Были также предприняты поиски следов остатков сверхновых оптическими и радиоастрономическими средствами в направлении радиопульсаров. В одном из случаев у пульсара СР1919 как будто бы обнаружился следы радиоисточника, похожего на остаток сверхновой. Но здесь мы сталкиваемся с рядом противоречий. При периоде пульсара 1,33 сек, судя по нескольким пульсарам со сходными периодами, его возраст должен превышать несколько миллионов лет. Между тем возраст радиоизлучающих остатков сверхновых обычно не более 300 тыс. лет. Здесь явное противоречие между возрастами пульсара и остатка сверхновой. Либо эти объекты между собой не связаны, а случайно находятся на одном луче зрения, либо пульсары значительно моложе, но с самого начала имели большой период пульсаций.

Как видим, неожиданности в исследованиях пульсаров встречались астрофизикам на каждом шагу. Еще одной неожиданностью было открытие пульсации рентгеновских источников излучения. На этот раз по традиции дело началось опять с Крабовидной туманности.

Ракетными исследованиями с рентгеновской аппаратурой, чувствительной к мягким рентгеновским лучам, было найдено, что мягкое рентгеновское излучение Крабовидной туманности имеет несколько переменный характер: примерно 5% рентгеновского излучения колебалось с периодом, таким же, как и период радиопульсара. Таким образом, пульсар в Крабовидной туманности оказался не только оптическим, но и рентгеновским (рис. 35).

Когда после сообщений об открытии рентгеновского пульсара были переобработаны наблюдения жесткого рентгеновского излучения Крабовидной туманности, полученные в 1967 г. на стратостатах с автоматической рентгеновской аппаратурой, то оказалось, что 7% этого излучения тоже было пульсирующим.

Рентгеновский пульсар, таким образом, мог быть обнаружен ранее первых радиопульсаров, но этого не произошло, так как существование быстрых колебаний излучения тогда не предполагалось.

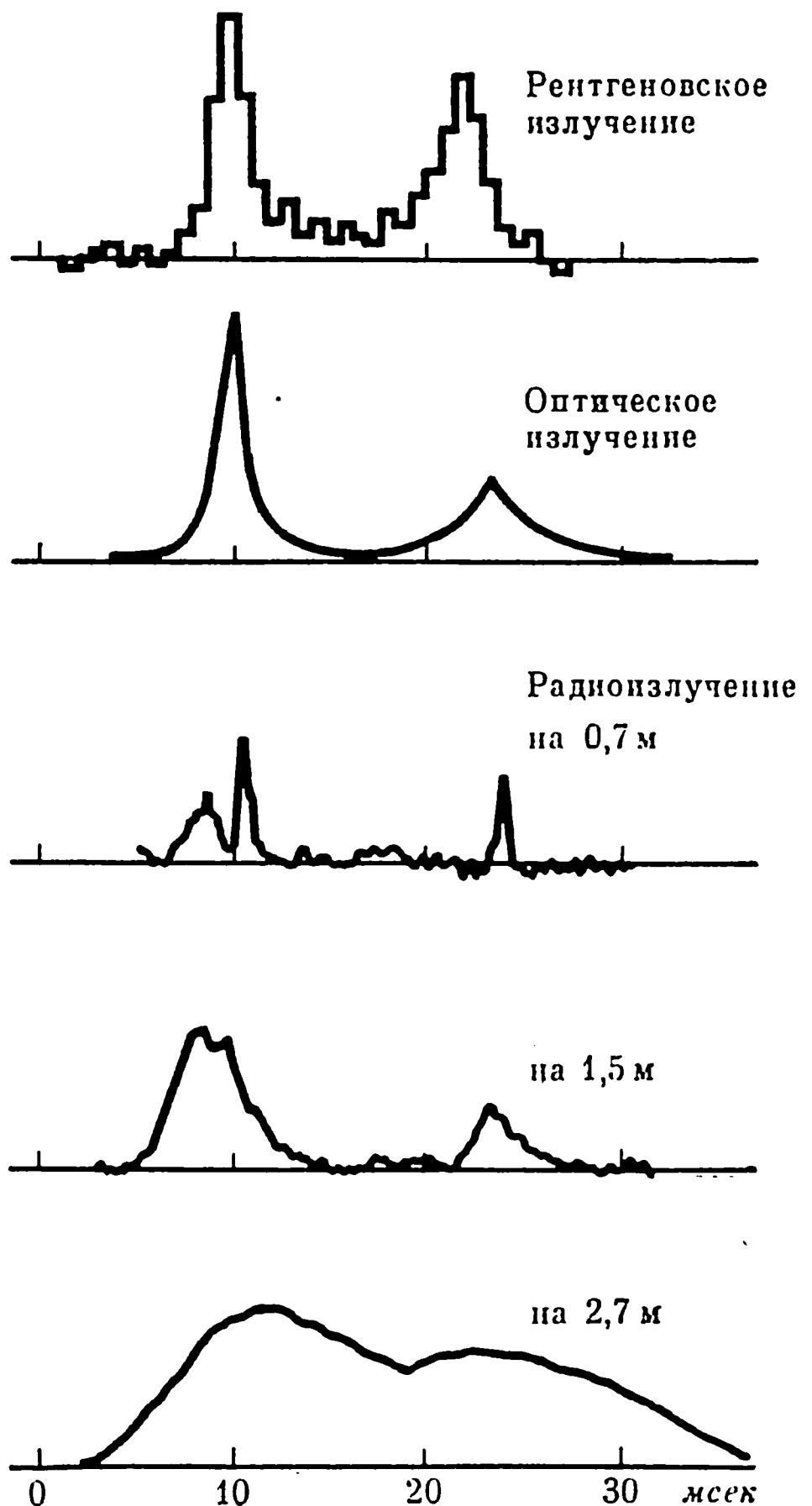


Рис. 35. Форма импульсов и интерпульсов оптического пульсара в Крабовидной туманности в рентгеновских и оптических лучах и на нескольких длинах радиоволн

В баллонных (аэростатных) и ракетных экспериментах теперь измерили и гамма-излучение Крабовидной туманности. Оно тоже носит пульсирующий характер с тем же периодом. К 1971 г. обнаружены следы гамма-излучения этого объекта до энергий 150 Мэв. Причем, если судить по падению оптического и рентгеновского излучений с длиной волны у туманности и у пульсара, в рентгеновском и гамма-излучениях роль пульсара систематически возрастает и в гамма-излучении господствует только излучение пульсара. Если сопоставить все электромагнитное излучение туманности и пульсара на всех длинах волн, то ста-

повится очевидным, что у оптических и рентгеновских пульсаций, по-видимому, одинаковый механизм излучения, а у радиопульсации свой особый. Одинаковый период тех и других говорит лишь о том, что оба механизма работают на поверхности одного и того же объекта.

Если так, то возможны и такие пульсары, у которых имеется только радиопульсация, а сильного оптического и рентгеновского излучения нет. Может быть, это и есть наблюдаемые типичные радиопульсары? Но тогда могут быть и оптические и рентгеновские пульсары без сильного радиоизлучения. На такую возможность указал советский астрофизик В. Л. Гинзбург, ссылаясь при этом на историю исследования квазаров. Они тоже были обнаружены сначала по значительному радиоизлучению, оказались совпадающими со звездоподобными голубыми объектами, а затем было найдено множество таких звездоподобных голубых объектов без сильного радиоизлучения. Не повторяется ли и здесь та же история?

Возможно, что в пользу такой гипотезы говорит открытие пульсации трех галактических рентгеновских источников. Ракетные исследования этих объектов в 1971 г. показали, что некоторые из рентгеновских источников обнаруживают пульсации излучения. Получение периода пульсации из материалов, собранных счетчиками рентгеновского излучения, сложно, поэтому оценки периода для первых рентгеновских пульсаров, как показывает это явление, были противоречивы. Например, рентгеновский источник Лебедь-X-1 имел период 0,073 сек, либо 0,292 сек, либо 1,1 и 1,2 сек, или даже более 5 сек! Для рентгеновского источника Центавр-X-3 — период 4,87 сек.

Являются ли эти рентгеновские пульсары родственниками универсального пульсара в Крабовидной туманности, пока неизвестно. Неизвестно пока и то, являются ли пульсирующими все объекты с рентгеновским излучением. Несомненно, что в этой области мы находимся накануне важных открытий.

Нейтронные звезды — финал эволюции звезд средней массы

Итак, после изучения пульсаров стало ясным, что ими, вероятнее всего, могут быть нейтронные звезды, существование которых было предсказано еще тридцать лет

назад Л. Д. Ландау. В их пользу говорили малые размеры и чрезвычайно быстрое вращение и, наконец, то, что они рождаются в ходе взрывов сверхновых.

Предсказание нейтронных звезд связано с заключительными стадиями звездной эволюции. В главе II мы рассматривали первоначальную и «ядерную» стадии эволюции звезд и отметили, что после накопления в центре звезды «золы» — элементов группы железа (рис. 36) — повышение температуры за счет сжатия звездных недр уже не ведет к ядерным реакциям, сопровождающимся выделением энергии. Звезда вступает в заключительную, чисто гравитационную стадию эволюции.

Если при каждом переходе на новый «сорт» ядерного горючего сила тяготения к центру перевешивала газовое и световое давление внутренних слоев звезды и вызывала сжатие до включения новой ядерной реакции с выделением энергии, то теперь, поскольку «ядерная печь» звезды не разгорается, газовое давление уже не останавливает гравитационного сжатия и судьба звезды оказывается целиком в зависимости от ее массы.

В звездах малой массы (к моменту сжатия — не более $1,4 M_{\odot}$) гравитационное сжатие создает плотности 10^4 — 10^{10} г/см³. При таких плотностях происходит разрушение атомных структур. Вспомним, что атом состоит из ядра и окружающих его оболочек электронов. Давление отрывает электроны, оставляя ядра «голыми». В результате образуется вырожденный газ, упругость которого останавливает сжатие звезды. Возникает белый карлик.

Если же звезда имеет среднюю массу от $1,4$ до $10 M_{\odot}$, то давления вырожденного газа оказывается недостаточно для остановки гравитационного сжатия. По одной из теорий этого процесса, при температуре выше 5 млрд. градусов в недрах звезды важное значение приобретают реакции с образованием нейтрино—элементарных частиц, не имеющих заряда и массы покоя и поэтому беспрепятственно проходящих через звездные недра. Образующиеся нейтрино уносят значительную долю энергии, выделяемой при гравитационном сжатии. Подсчитано, что нейтринная светимость (другими словами, энергетическая отдача нейтрино) в это время превосходит оптическую светимость звезды. Отвод энергии через нейтрино позволяет удваивать сжатие вещества за 1 секунду. Ни равновесие слоев звезды, ни плавное сжатие их при таких темпах стано-

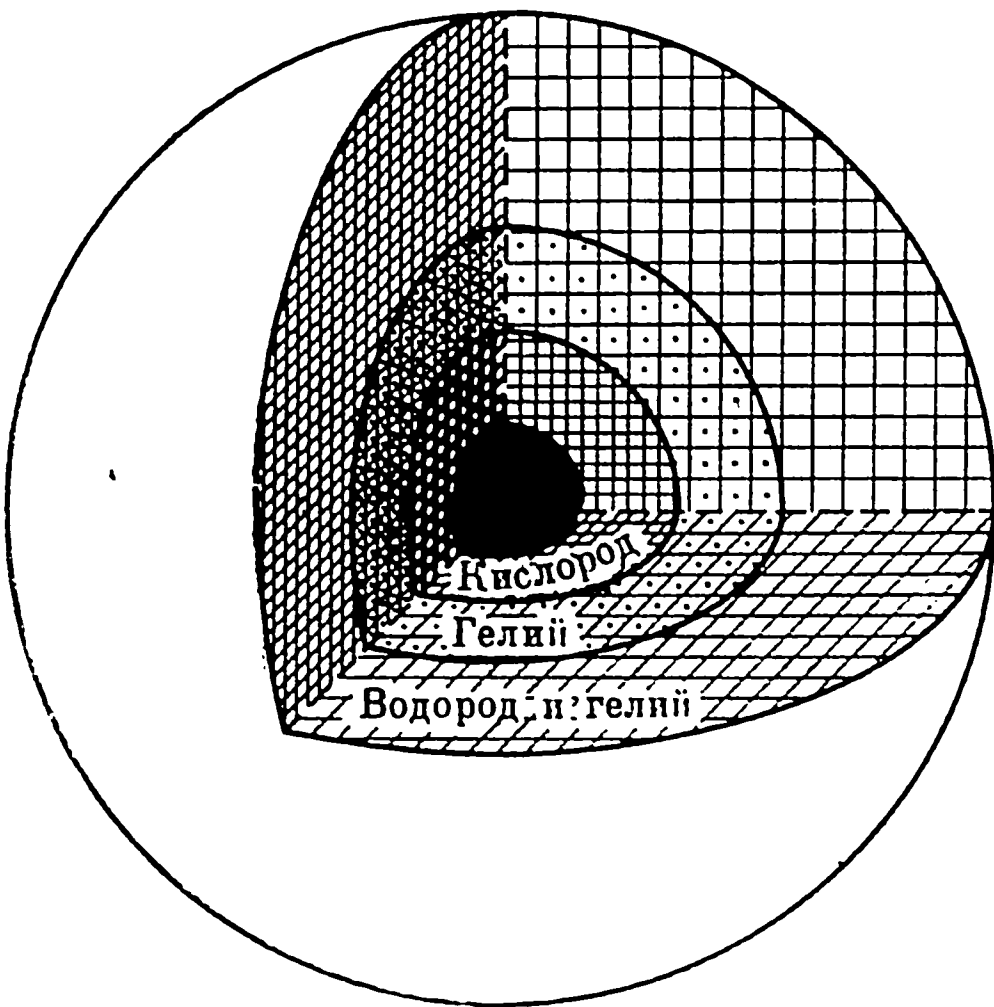


Рис. 36. Строение звезды непосредственно перед внешней сверхновой типа Кассиопеи-А. Масса звезды принята в $30 M_{\odot}$, из них 7 приходится на центральное ядро из элементов группы железа, 3 — на кислородный слой, а на гелиево-водородный слой приходится около $20 M_{\odot}$.

вятся невозможными, гравитационное сжатие приобретает стремительный катастрофический характер, наступает, как говорят астрофизики, гравитационный коллапс (рис. 37).

Имеется ли сила, способная остановить разогнавшиеся гравитацией слои звезды? Оказывается, такая сила существует и заключается в ядерном строении вещества. Когда сжатие создает плотности $10^{12}—10^{15}$ г/см³, т. е. плотности, какие по подсчетам физиков имеют атомные ядра, начинается разрушение атомных ядер. Они распадаются на нейтроны и протоны. Последние поглощают электроны вырожденного газа и превращаются в нейтроны (при этих реакциях продолжают выделяться нейтрино). Происходит, как говорят астрофизики, нейтронизация вещества звезды. Физически вещество звезды превращается в своего рода нейтронную жидкость, имеющую ядерную плотность и характерную для жидкостей малую сжимаемость (упругость).

Внешне такая звезда представляет собой как бы гигантское ядро атома, перенасыщенного нейтронами, но нейтроны и немногочисленные протоны в этом сверхъядре сцеплены не внутриядерными, а гравитационными силами.

Упругость нейтронной жидкости и останавливает гравитационный коллапс на уровне ядерной плотности, если

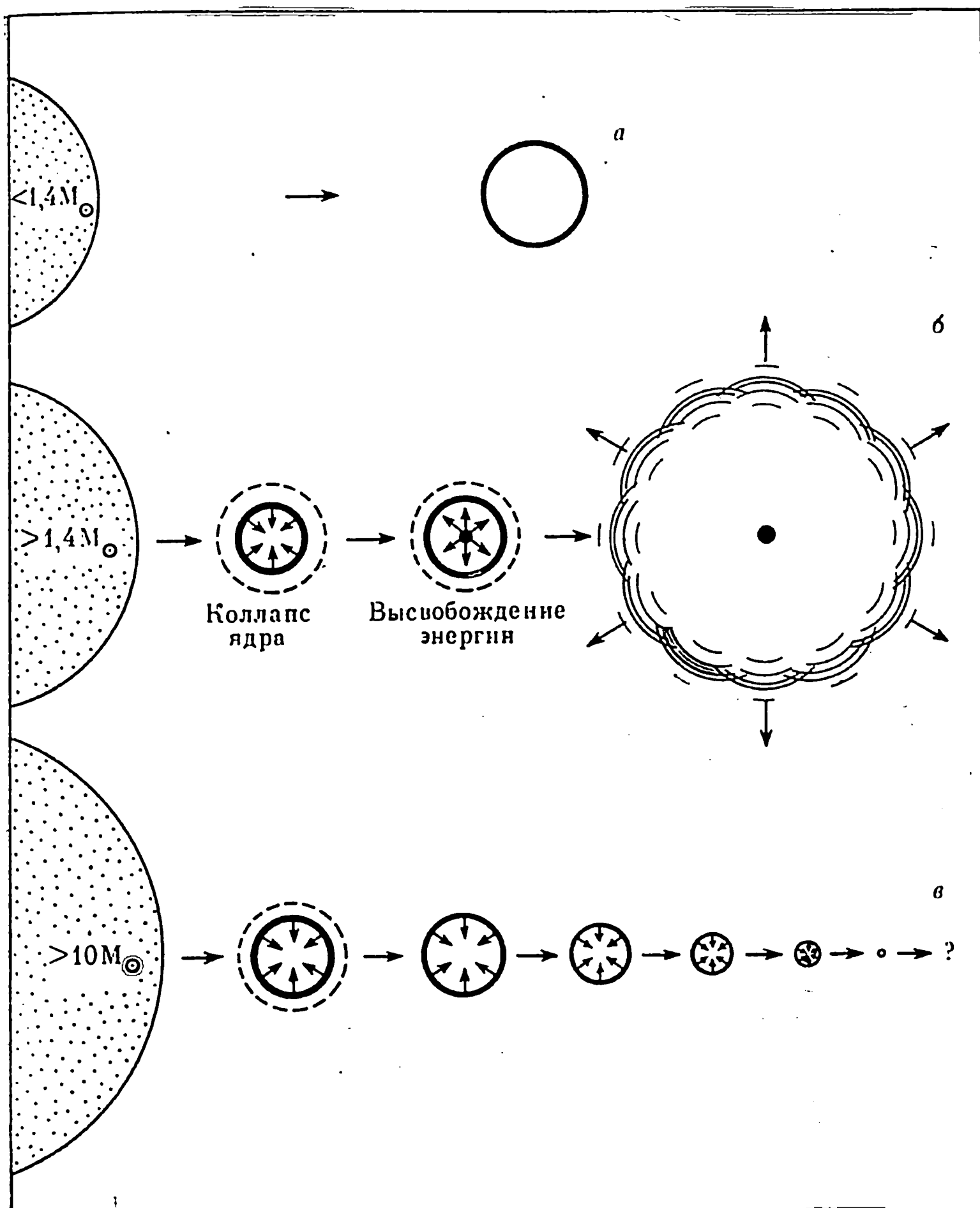


Рис. 37. Три варианта финальной стадии звездной эволюции
 а — превращение в белый карлик, б — в сверхновую с нейтронной звездой в центре, в — в коллапсар — звезду, впадающую в релятивистский коллапс

масса звезды не превышает двух солнечных масс. Если же масса звезды больше, то для задержки коллапса в звезде должен произойти сброс излишней массы взрывом или спокойным истечением. После остановки коллапса образуется нейтронная звезда. Но, если образование белых

карликов происходит, по-видимому, спокойно, без катастрофических взрывов, образование нейтронной звезды идет бурно. Нейтрино уносят лишь часть высвободившейся при сжатии гравитационной энергии, остальная ее часть расходуется на образование неустойчивых ядер, быстро распадающихся с выделением энергии в форме взрыва. При взрыве образуется ударная волна, которая выбрасывает из звезды наружные слои, образуется газовая расширяющаяся оболочка, которую мы и наблюдаем как явление сверхновой.

Что касается массивных и сверхмассивных звезд, намного превосходящих по массе Солнце (более чем в 10 раз), то даже после истечения и сброса части избыточной массы сила гравитации в этом случае оказывается больше силы упругости нейтронной жидкости и коллапс будет продолжаться неограниченно долго. Нам трудно себе представить, что за рубежом ядерной плотности вещества сильная гравитация может создать еще более сверхплотные конфигурации. С точки зрения исследователя, наблюдающего явление со стороны, сжатие приостанавливается в силу некоторых закономерностей теории относительности, когда коллапсирующая звезда достигает радиуса, называемого радиусом Шварцшильда. Время для нее с точки зрения далекого наблюдателя остановится и сжатие прекратится. Излучение такой звезды уже не сможет выходить наружу, и мы его не обнаружим. Можно лишь рассчитывать, что, если эта звезда была компонентой двойной системы, ее притяжение скажется на характере движения другой компоненты, которая может быть и обычной звездой. Тесные двойные звезды с невидимыми спутниками обнаружены. Возможно, среди них есть и такие, невидимые компоненты которых являются сколлапсировавшими массивными звездами, а видимые компоненты — их спутниками. Но пока это лишь предположения. Нужна еще большая работа по изучению свойств сколлапсировавших звезд.

Заметим, что такие звезды получили много цветастых названий: их называют и застывшими звездами, и черными дырами, и коллапсарами. Не исключено, что современная техника наблюдений уже давно в состоянии их обнаружить, но к ним, как это было в случае нейтронных звезд, пока еще не подобран ключ. У нейтронных звезд таким ключом оказалась радиопульсация излучения.

У сколлапсировавших звезд им должен оказаться какой-нибудь гравитационный эффект.

Но вернемся к нейтронным звездам. Их внутренняя структура изучалась теоретически еще до открытия явления пульсаров и многое уже было установлено. Масса нейтронной звезды предполагается приблизительно равной массе Солнца, хотя может оказаться и немного больше или вдвое меньше. Радиус звезды около 10 км, плотность вещества, как и у всех звезд, возрастает к центру, достигая там около 10^{15} г/см³, т. е. около 1 млрд. т в см³. К поверхности плотность постепенно убывает. Граница чисто нейтронного вещества — сфера радиусом около 9 км, ее плотность около 10^{11} г/см³, а температура всего нейтронного ядра около 0,5 млрд. градусов. Во внешнем слое нейтронной звезды имеются уже и атомные ядра и электроны, плотность вещества снижается до 10^7 г/см³, а температура — до 1 млн. градусов.

Если идти от периферии нейтронной звезды к ее центру, то, по современным представлениям, в ней можно установить несколько удивительных по свойствам слоев (рис. 38). Самый внешний слой, где убывают и температуры и плотность, имеет такой же состав, как и вещество белых карликов, — плазму из электронов и ядер (главным образом железа). Но расчеты показали, что при тех комбинациях температур и плотностей, которые имеются в оболочке нейтронной звезды, плазма может существовать не только в газообразном, но и в жидком и даже твердом виде! Поэтому предполагают, что под наружным тонким газовым и жидким слоем (всего, скажем, в один сантиметр) расположена твердая корка плазмы.

Под твердой оболочкой находится нейтронная жидкость, в которой имеются отдельные протоны. Поэтому этот слой при высокой плотности и существенном влиянии ядерных сил может обладать удивительными физическими свойствами — сверхтекучестью и сверхпроводимостью.

Сверхтекучестью в физике называют особое явление, когда газ или жидкость приобретают свойство течь по веществу без всякого сопротивления. В лабораторных условиях она была обнаружена у жидкого гелия, охлажденного до температуры в 2°,17 К. В нейтронной звезде это свойство предполагается возможным у нейтронной жидкости в условиях высоких температур, плотности и воздействия ядерных сил.

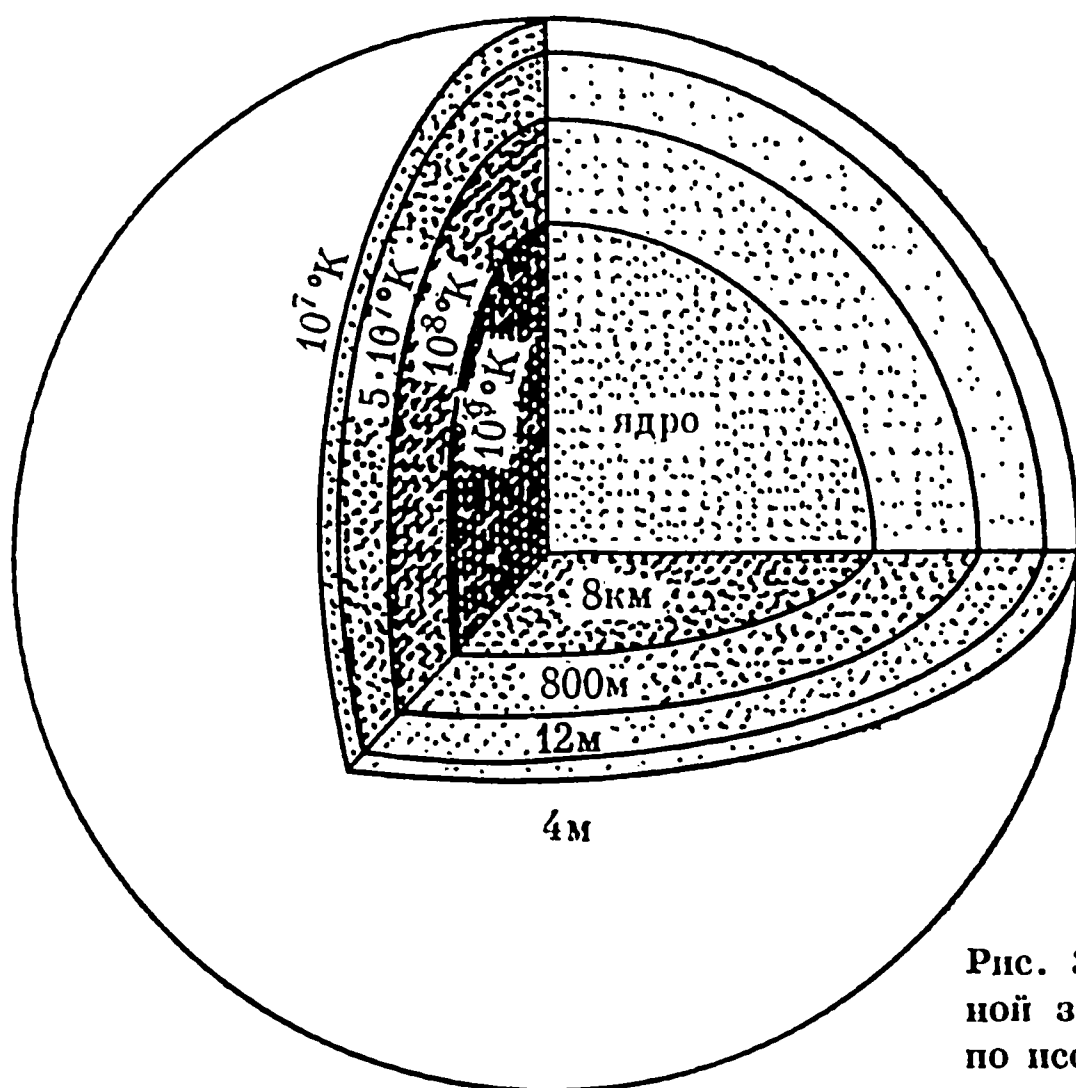


Рис. 38. Строение нейтронной звезды, предполагаемое по исследованиям поведения радионалучения пульсара

Сверхпроводимостью называют состояние металла, в котором электрический ток может течь также без всякого сопротивления. В лабораторных условиях сверхпроводящими становились некоторые материалы при температурах ниже 21°K . Сверхпроводимость, таким образом, является как бы тоже сверхтекучестью электрических зарядов в проводящем веществе. В условиях нейтронной звезды сверхпроводимость должна существовать у тех нескольких процентов протонов и электронов, которые содержатся в нейтронной жидкости. Как мы увидим далее, эти предположения о свойствах нейтронной жидкости нашли подтверждение в скачкообразных изменениях периодов пульсаров.

О том, каковы свойства вещества в центре нейтронной звезды, пока известно мало. Плотность там может быть от 10^{15} г/см^3 и выше, температура около 1 млрд. градусов, как и во всей нейтронной жидкости звезды. Предполагают, что нейтронное вещество в центре звезды уже теряет свойства сверхтекучести и сверхпроводимости. Если теоретикам и наблюдателям удастся выяснить что-нибудь о свойствах нейтронных звезд, то это будет важным успехом в изучении сверхплотного вещества.

Эволюция нейтронной звезды после образования из обычной сравнительно проста. В результате нейтринного и электромагнитного излучений молодая нейтронная звезда в момент образования быстро остывает до своих обычных температур, после чего может существовать сотни миллионов и даже миллиарды лет, пройдя, очевидно, стадию пульсара. Пока неясно, все ли нейтронные звезды должны сначала становиться пульсарами или же есть среди них «немые». Ясно одно, что и после того, как угаснут пульсации электромагнитного излучения нейтронной звезды, она будет продолжать существовать в своем устойчивом состоянии.

Почему нейтронная звезда оказалась пульсаром?

Наблюдения пульсаров убедили нас в том, что это нейтронные звезды. Но до открытия пульсаров быстрые колебания излучения нейтронных звезд теоретически не предсказывались. Теория таким образом прошла мимо важного свойства нейтронных звезд. Поэтому теоретикам пришлось искать ответ, почему нейтронная звезда должна быть пульсаром. В некотором отношении теория была близка к такому предсказанию, так как пульсация излучения несомненно была связана с важнейшими свойствами нейтронных звезд: быстрым вращением и большим магнитным полем. Тем не менее до сих пор нет полного объяснения возникновения пульсирующего излучения нейтронных звезд, хотя предлагаются различные гипотезы, объясняющие отдельные особенности явления.

Быстрое осевое вращение и связанный с ним короткий период вращения нейтронной звезды имеют простое механическое объяснение. Согласно закону сохранения момента вращения звезда, уменьшая вследствие гравитационного коллапса свой радиус с нормальных размеров до 10 км — примерно в сто тысяч раз, — должна уменьшить период своего обращения обратно пропорционально квадрату радиуса, т. е. в нашем случае в 10 млрд. раз. Если взять для примера период солнечного осевого вращения (около 25 суток), то он уменьшился бы до 0,002 сек. Заметим, однако, что для звезды с массой Солнца и радиусом 10 км такой период вращения был бы невозможен из-за большой центробежной силы на по-

верхности, которая превысила бы силу тяготения звезды. В действительности самый короткий период для такого объекта не меньше 0,016 сек. С таким периодом вращения начинает существование нейтронная звезда радиусом 10 км и с массой, равной солнечной (начальный период ее вращения был бы, по-видимому, около 200 суток, что вполне соответствует реальному периоду вращения красного гиганта).

Как мы видели, после образования нейтронная звезда постепенно увеличивает период, другими словами, она тормозит свое осевое вращение. Подсчеты для пульсара Крабовидной туманности дают запас механической энергии осевого вращения около 10^{50} эргов, а изменение периода его пульсаций указывает на потери энергии вращения порядка 10^{38} эрг/сек. С другой стороны, можно подсчитать мощность всего излучения самой Крабовидной туманности, окружающей пульсар. Она тоже получается около 10^{38} эрг/сек. Следовательно, механическая энергия нейтронной звезды каким-то путем непрерывно превращается в электромагнитную, расходуемую на поддержание излучения Крабовидной туманности. Таким образом, изменение периода пульсации пульсара Крабовидной туманности подтвердило предположения И. С. Шкловского о том, что излучение этого остатка сверхновой поддерживается нейтронной звездой.

Посмотрим теперь, откуда возникает большое магнитное поле нейтронной звезды. При сжатии звезды вследствие гравитационного коллапса магнитный поток (т. е. число силовых линий магнитного поля звезды) должен сохраняться неизменным. Вследствие этого при сжатии радиуса звезды в сто тысяч раз ее поверхность уменьшится в десять миллиардов раз и соответственно возрастет число силовых линий на единицу поверхности звезды (напряженность магнитного поля). У обычных звезд напряженность магнитного поля на поверхности 100—1000 э (например, в солнечных пятнах), следовательно, у нейтронной звезды оно будет 10^{12} — 10^{13} э.

При таком большом магнитном поле в нем сосредоточена магнитная энергия звезды: около 10^{43} эргов. Плотность ее получается около 4 кг/см³, тогда как плотность плазменной оболочки нейтронной звезды близка к плотности межзвездной среды. Таким образом, в плазменной оболочке господствует необычайно сильное магнитное

поле. Именно в его свойствах, очевидно, заключаются секреты пульсирующего излучения.

Американский астрофизик Т. Голд указал на важную роль магнитного поля (магнитосферы) нейтронной звезды в образовании космического излучения, идущего из остатков сверхновых. Магнитосфера жестко, как одно целое, вращается вместе со звездой, поэтому заряды, находящиеся в ее плазменной оболочке, могут ускоряться центробежной силой осевого вращения звезды вдоль тех магнитных силовых линий, которые удаляются от поверхности звезды (рис. 39). Но очевидно также, что на расстоянии от звезды, где скорость разгона приблизится к световой, магнитное поле уже не может удерживать заряды и они вылетают из своей центрифуги в качестве знакомых нам релятивистских электронов, протонов, позитронов и легких ядер, т. е. космических лучей. Заряды, набирая в магнитосфере скорость, уносят значительную долю энергии вращения нейтронной звезды, вследствие чего ее вращение должно систематически тормозиться. Как мы знаем, космические лучи, выскользнув из магнитосферы звезды, оказываются в магнитной ловушке, созданной запутанным магнитным полем остатка сверхновой. Они и создают магнитно-тормозное излучение, например, Крабовидной туманности во всех областях длин волн.

Но должны ли быстро исчерпаться заряды, если магнитное поле выметает их из магнитосферы звезды? Нет, из основ теории электромагнетизма известно, что вращающееся магнитное поле индуцирует вокруг себя электрическое поле. Напряженность его над поверхностью нейтронной звезды около 10^{11} в/см. Это электрическое поле постоянно срывает с поверхности звезды заряды в магнитосферу и поддерживает ее плотность на одном уровне.

Удивительно точная периодичность импульсов пульсара и их кратковременность указывают на излучение в узком пучке, подобно прожектору. Иногда его сравнивают с маяком, на башне которого находится источник направленного света, равномерно вращающийся вокруг вертикальной оси. С моря корабли видят такой маяк в темноте как равномерно вспыхивающий (пульсирующий) сигнал. Изменение поляризации радиоизлучения пульсара в течение всплеска свидетельствует, что источник

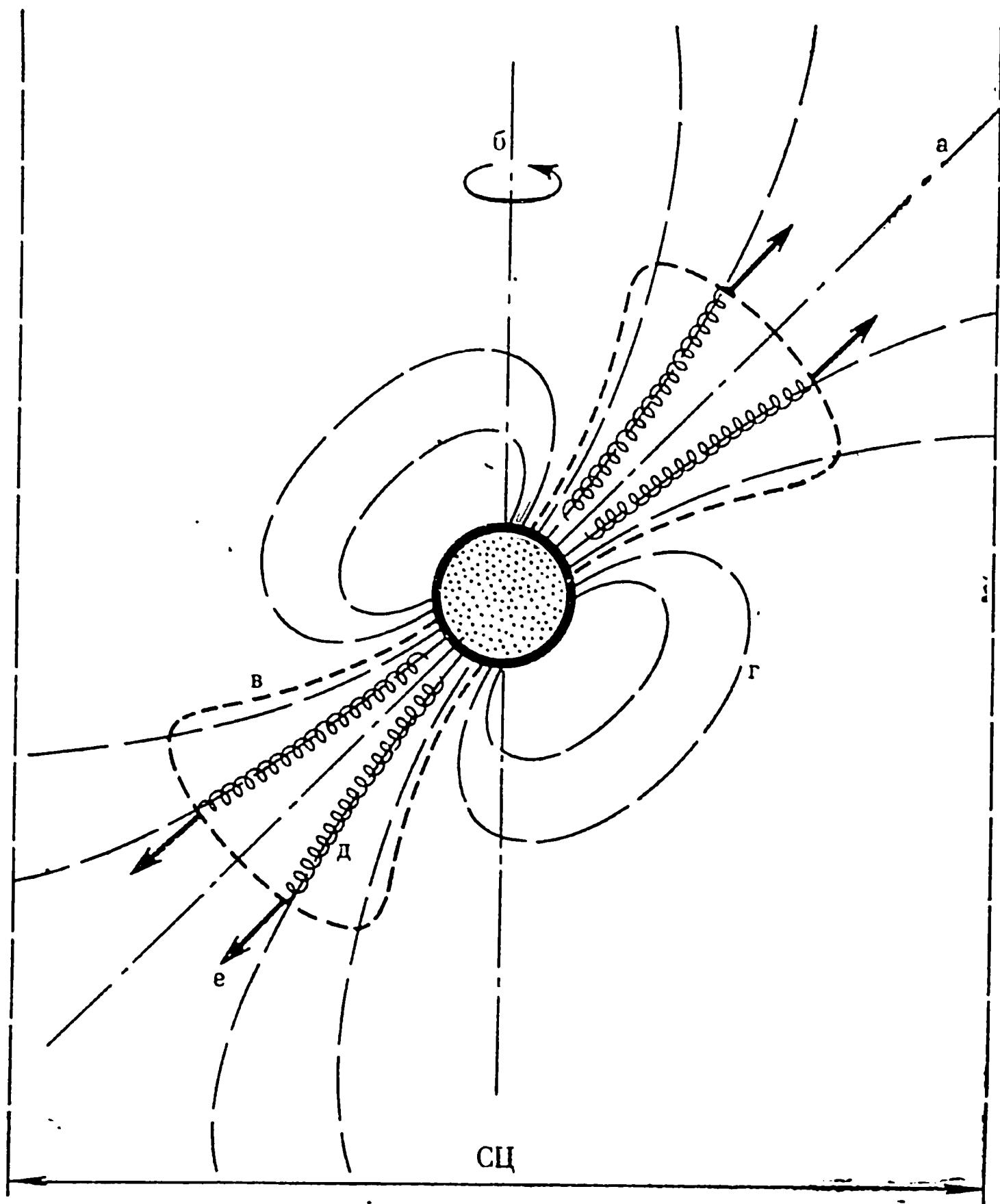


Рис. 39. Дипольный характер магнитного поля пульсара

Магнитная ось (а) пульсара не совпадает с осью его вращения (б). Излучение пульсара направлено в конусе (е) вдоль магнитной оси и воспринимается нашей аппаратурой, когда магнитная ось с излучающим конусом пересекает наш луч зрения (г — магнитные силовые линии, д — траектория заряда, е — синхротронное излучение, СЦ — диаметр «светового цилиндра», на поверхности которого скорости частиц, участвующих во вращении нейтронной звезды, достигают скорости света)

пульсирующего излучения на нейтронной звезде также участвует во вращении.

В зависимости от природы излучателя он может находиться, вероятно, либо на поверхности, либо в магнитосфере, вращающейся вместе со звездой.

Как показывают наблюдения, область, где образуется пульсирующее излучение, очень невелика, но дает очень высокие потоки — 10^{14} — 10^{17} вт/см² в радиоволнах и 10^{20} вт/см² — в оптических волнах. Таким высоким потокам при малых размерах излучающих областей (о чем свидетельствуют, как мы уже говорили, малые длительности всплесков сравнительно с периодом пульсации) соответствует невообразимой величины температура: 10^{24} градусов. Реальные температуры такой величины отсутствуют даже в центрах самых горячих звезд и вряд ли осуществлялись даже в начальную эпоху расширения Вселенной. Если такая температура излучающей области была бы реальной, то мы обнаружили бы очень сильное гамма-излучение, намного большее, чем действительно обнаруживаемое радиоизлучение. Между тем сильного гамма-излучения не наблюдается, следовательно, излучение имеет явно нетепловой характер, и высокая яркость его говорит не об особом тепловом режиме, а о специфическом физическом процессе такого свечения. Полагают, что пульсирующее излучение нейтронных звезд получается в результате процесса с энергетической накачкой, такой, какая осуществляется в мазерах и лазерах (в мазерах излучение атомов и молекул происходит в радиодиапазоне, а в лазерах — в оптическом). В астрофизике найдено несколько явлений такой природы: некоторые всплески радиоизлучения Солнца и космические мазеры в межзвездном газе. Именно мазерные процессы могут создавать высокие по яркости, прожекторно направленные и поляризованные пучки излучения, которые аналогичны наблюдаемым у пульсаров.

Первоначально предполагалось, что источниками такого излучения могут быть своего рода пятна на поверхности нейтронной звезды (было даже предположение о вулканах в кристаллизованной коре), но вскоре стало ясно, что здесь важную роль играет характер магнитного поля нейтронной звезды. В космической природе мы чаще встречаемся с двухполюсным (дипольным) магнетизмом, примером могут служить магнитные поля пла-

нет Земли и Марса, хотя магнитное поле Солнца имеет иной характер. Но есть, по-видимому, и звезды с дипольным характером магнитного поля. Силовые линии в нем идут от поверхности звезды только у магнитных полюсов. Именно вдоль магнитной оси нейтронной звезды и должны работать центрифуга, рождающая космические лучи, и мазерный механизм излучения. Правда, если магнитная ось и ось вращения совпадают, то это излучение будет замечено лишь в том случае, когда ось направлена на наблюдателя, и оно не будет казаться пульсирующим. Но это исключительно редкий случай. Существование пульсаров свидетельствует о том, что обычно магнитная ось не совпадает с осью вращения нейтронной звезды. В этом случае и будет осуществляться пульсация излучения по принципу вращающегося маяка.

Из сказанного следует, что не все молодые нейтронные звезды могут нами наблюдаться в виде пульсаров, а только те, у которых магнитная ось при вращении оказывается близка к лучу зрения. Поэтому конус пучка излучения пульсара пересекает его. Но такие совпадения, естественно, редки вследствие узости пучков. Поэтому в большинстве остатков оболочек сверхновых и не обнаружено пульсаров, хотя именно они, может быть, ответственны за излучение остатков и существуют намного дольше их. Просто сигналы их маяков проскальзывают далеко от Земли.

Итак, только что образовавшаяся нейтронная звезда является пульсаром, но, расходуя свою энергию вращения на рождение космических лучей, она за 10—100 млн. лет должна исчерпать значительную часть своей энергии и погасить свое пульсирующее излучение. К этому времени мощность пульсара низка, вырабатываемые им релятивистские частицы имеют малую энергию и не выметают так далеко межзвездный газ вокруг магнитосферы звезды, как это они делали раньше. При мощности излучения пульсара ниже 10^{25} вт размеры зоны выметенного межзвездного газа становятся меньше радиуса действия сил гравитации и он уже может падать на плотную поверхность нейтронной звезды.

Падение межзвездных частиц на поверхность нейтронной звезды оказывается неожиданным подарком для нее. Примерно 50% массы частиц, падающих на нейтронную звезду, превращается в энергию. Это очень эффективный

даже по сравнению с термоядерным процессом путь получения энергии (о нем впервые упомянул Я. Б. Зельдович). Звезда снова может начать работать как пульсар за счет добытой таким путем энергии. Расчеты показывают, что при имеющейся малой плотности межзвездного газа нейтронная звезда может продлить свою стадию пульсара вдвое.

Завершая на этом описание свойств пульсаров и гипотез, объясняющих основные из свойств, мы должны отметить, что, несмотря на большой размах наблюдательных и теоретических работ по пульсарам, а еще ранее — по нейтронным звездам, пока еще не найдено окончательной, универсальной схемы, объясняющей все наблюдаемые факты о пульсарах. Но неослабевающий интерес к ним создает уверенность, что в недалеком будущем теория пульсаров будет завершена.

В конце концов пульсары оказались частью проблемы сверхновых звезд, неожиданной по богатству фактов иллюстрацией финальной стадии ядра взорвавшейся звезды. Это с новой силой возвращает астрофизиков к изучению центральной проблемы: к причинам взрыва сверхновой, к механизму ее взрывного процесса, к стадии разгорания ее вспышки, когда внешняя и внутренняя область звезды устремляются в противоположных направлениях — оболочка разлетается, а ядро сжимается в нейтронную звезду. Уже сейчас до окончательного решения основных загадок пульсаров приобретает важность вопрос о взаимодействии нейтронной звезды с остатком сверхновой. И таких вопросов в проблеме сверхновых еще немало.

НЕСКОЛЬКО ТРУДНЫХ ВОПРОСОВ

Классификация галактических сверхновых

Как можно было заметить, между сверхновыми, наблюдавшимися в других галактиках, и сверхновыми, наблюдавшимися в нашей звездной системе, существует своего рода исторически сложившееся разделение труда. Наблюдениям доступно большое число галактик, так что, несмотря на редкость явлений сверхновых, их в общем удается достаточно регулярно находить (сейчас их обнаруживают по два десятка ежегодно). Благодаря этому мы получили много сведений о спектрах, кривых блеска и распределении сверхновых различных типов в галактиках. Но удаленность других звездных систем препятствует исследованиям сверхновых на поздних стадиях. Редкость вспышек в полной мере сказывается на скудости данных о них в нашей Галактике. Только для трех сверхновых имеются сведения о блеске в период вспышки, но сами вспышки произошли так давно, что получить какие-либо спектры было невозможно из-за отсутствия в те времена не только спектрального метода исследования, но и телескопов. Зато доступными для исследований оказались расширяющиеся остатки оболочек сверхновых как спектрально, так и оптическими и радио-астрономическими средствами. Были найдены еще более старые остатки сверхновых, а затем и звездные остатки этих вспышек — пульсары.

В большинстве случаев у хорошо исследованной внегалактической сверхновой можно оценить ее тип: по спектру, кривой блеска, а иногда и по тому, в какой галактике она найдена. К сожалению, для наших галактических сверхновых такой четкости в выяснении типа нет. Исключением можно считать сверхновые Браге и Кеплера с хорошо известными кривыми блеска, очень

похожими на кривые блеска сверхновых I типа. В остальных двух случаях нужно привлечь все имеющиеся о них данные, чтобы решить, к какому типу их нужно отнести. Кроме кривых блеска нужно учесть и скорость расширения оболочки, ее массу, характер и форму радиоисточника, являющегося остатком сверхновой, наличие пульсара. И все же выводы о типах сверхновых будут очень предположительными.

К каким же типам следует отнести сверхновые, после которых остались Кассиопея-А и Крабовидная туманность? Как сначала ни покажется странным, легче было найти тип сверхновой по Кассиопее-А, хотя мы совершенно не знаем кривой ее блеска. По высокой скорости расширения и массе оболочки было сделано заключение, что сверхновая была результатом взрыва массивной звезды, принадлежавшей самой плоской звездной подсистеме. А к числу объектов этой подсистемы как мы уже знаем, относятся именно сверхновые II типа. Вместе с Кассиопеей-А ко II типу сверхновых было отнесено и большинство старых остатков, обнаруженных в нашей Галактике и в Магеллановых Облаках.

Но это решение благополучно только на первый взгляд, так как содержит серьезное противоречие с наблюдаемыми фактами. Такой сильный по мощности радиоисточник, как Кассиопея-А, оказался в нашей Галактике единственным, тогда как исследования внегалактических сверхновых II типа со всей определенностью говорили, что подобные объекты должны вспыхивать довольно часто: раз в пятьдесят—сто лет. Следовательно, в нашей Галактике должно быть много радиоисточников несколько старше и моложе Кассиопеи-А, а между тем она оказалась единственной. Видимо, Кассиопея-А не является типичной сверхновой II типа, хотя по массе взорвавшаяся звезда принадлежала к тому же типу звездного населения, что и сверхновые II типа. Объяснение было найдено тогда, когда Цвикки выявил еще несколько редких типов сверхновых и среди них III тип, наиболее соответствующий свойствам Кассиопеи-А.

Что касается вспышки, оставившей после себя Крабовидную туманность, то по отрывочным оценкам блеска девятисотлетней давности и по умеренной скорости расширения ее остатка и соответственно его небольшой массе Минковский отнес эту сверхновую к I типу. Но

теперь выяснилось, что скорости расширения остатков оболочек сверхновых I типа, например сверхновой Тихо, намного выше, чем у Крабовидной туманности, кроме того, в отличие от остатков сверхновых I типа последняя имеет не оболочечную, а сердцевинную структуру распределения яркости. Поэтому Минковский относит Крабовидную туманность к остаткам сверхновых II типа.

Но в этом случае опять возникают вопросы: а где остальные многочисленные остатки сверхновых II типа, вспыхивавших в нашей звездной системе почти каждые 50 лет? Ведь и Крабовидная туманность по своим характеристическим свойствам является в еще большей степени, чем Кассиопея-А, уникальной одиночкой. Не является ли она остатком сверхновой еще одного редкого типа, например карликовой сверхновой I' типа (2—3 таких внегалактических сверхновых найдены итальянским астрономом Ф. Бертола)?

Но тогда возникает вопрос: куда же исчезли в нашей Галактике сверхновые II типа? Ведь фактически они не представлены среди остатков сверхновых. То, что раньше вслед за Кассиопеей-А считали остатками сверхновых II типа — Петля в Лебеде, Парус-Х и другие объекты, — теперь вместе с Кассиопеей-А следует считать остатками сверхновых III типа, являющихся объектами молодой плоской звездной подсистемы (о чем свидетельствует тот факт, что эти старые остатки располагаются вблизи галактической плоскости). Складывается впечатление, что сверхновые II типа не оставляют после себя массивных радиопзлучающих оболочек. Теоретически это допустимо.

Сильной аргументацией в пользу того, что сверхновые II типа являлись финальной стадией эволюции массивных горячих звезд класса O, было сходное распределение тех и других: концентрация остатков и O-звезд к галактической плотности. В свое время И. С. Шкловский отмечал, что звезд этого класса в Галактике около 10 000, а длительность их существования 3—10 млн. лет. Следовательно, в Галактике должна образовываться в среднем одна такая звезда в 3—10 тыс. лет и соответственно так же часто гибнуть. Однако сверхновые II типа вспыхивают в десять раз чаще, поэтому допускалось, что взрываются подобным образом и некоторые массивные звезды класса B, которых очень много.

Если наблюдаемые остатки сверхновых относятся к III типу, то не будет расхождения между частотами образования и гибели звезд класса O и частотами вспышек сверхновых III типа. Но в этом случае опять пропали реликты сверхновых II типа.

Как сказал бы опытный шахматист, в классификации галактических сверхновых сложилась обстановка пата. Совсем недавно положение еще более осложнилось. В 1973 г. И. С. Шкловский, анализируя мощность рентгеновского излучения пульсаров и остатков, пришел к заключению, что остатки галактических сверхновых, наблюдаемые в нашей Галактике, первоначально имели небольшие массы (всего несколько процентов массы Солнца). Следовательно, заключил он, хорошо известные галактические остатки сверхновых не могут быть реликтами массивных звезд, а скорее всего остались от вспышек сверхновых I типа.

Возможно, в классификации галактических сверхновых и их остатков помогут разобраться пульсары. Большинство пульсаров из-за слабости их радиоизлучения найдено пока недалеко от Солнца, но уже ясно, что они встречаются не только вблизи галактической плоскости, но и на значительных расстояниях от нее. Очевидно, только часть пульсаров может являться объектами плоской подсистемы, пульсары же на больших расстояниях от галактической плоскости говорят о том, что они образовались из сверхновых промежуточной звездной подсистемы («диска»), т. е. из сверхновых I типа, хотя на местах сверхновых Браге и Кеплера пульсары наблюдениям недоступны.

Поиски «взрывчатки»

Все явления, связанные со сверхновыми, — оптически наблюдаемая вспышка, расширяющийся остаток оболочки и пульсар — говорят о быстром выделении гигантских количеств энергии в короткое время, т. е. о сильном взрыве как причине явления сверхновой. Действительно, по данным о кривых блеска, температурах сверхновых при вспышке и расстояниям до них получают оценки энергии, выделяемой при вспышке в виде излучений, порядка 10^{50} — 10^{51} эргов. Кроме того, огромные массы и высокие скорости расширения оторванных от звезд оболочек свидетельствуют о больших расходах и на кинетическую

энергию. В зависимости от масс и скоростей расширения она оценивается в 10^{50} — 10^{52} эргов. Таким образом, непосредственно при взрыве должно высвободиться такое количество энергии, чтобы получилась расширяющаяся оболочка с наблюдаемым оптическим явлением.

Но кроме энергии, выделяемой при взрыве, расширяющийся остаток оболочки сверхновой накапливает солидную энергию магнитного поля порядка сотой доли энергии, выделенной при взрыве. Это поле удерживает рождающиеся в магнитосфере нейтронной звезды космические лучи, энергия которых также составляет 1% энергии взрыва. По своему происхождению эти виды энергии, по видимому, не связаны со взрывом звезды, а есть результат потери вращательной энергии нейтронной звезды.

Примерно 40 тыс. лет оболочка сверхновой представляет собой горячий плазменный шар, запирающий космические лучи, пока температура его не снизится до 1 млн. градусов. После этого магнитная ловушка оболочки ослабевает и космические лучи вырываются из нее. От оболочки сверхновой остаются просто клочья межзвездного газа с невысокой температурой, а пульсар излучает все виды радиации прямо в межзвездное пространство. Он живет еще долгое время после исчезновения оболочки сверхновой.

Что же взрывается в звезде? Самое высокое выделение энергии на грамм расходуемого в ядерной реакции горючего получается при превращении четырех ядер водорода в ядро гелия при высоких температурах с образованием электронов и нейтрино. Но, как высока ни будет температура, эти реакции пойдут медленно, не путем взрыва. Поэтому были изучены другие ядерные реакции. Оказалось, что при температурах в 1 млрд. градусов становятся очень быстрыми ядерные реакции между ядрами водорода и ядрами легких элементов (углерод, кислород, азот и др.). Если бы почему-либо температура недр Солнца поднялась до 1 млрд. градусов, то эти ядерные реакции прошли бы в течение одной секунды и Солнце взорвалось бы. Но, поскольку в нашем Солнце ядер легких элементов очень мало, при взрыве выделилось бы всего 10^{49} эрг. Следовательно, при взрыве сверхновой в ее недрах должно быть легких элементов намного больше, чем в Солнце. Другими словами, это, действительно, должна быть проэволюционировавшая до конца ядерной стадии звезда. Легкие ядра —

продукты старых ядерных котлов этой звезды — образуют несколько последовательных зон между внешней водородной оболочкой и железным ядром звезды (рис. 36). Именно эти легкие ядра могут быть взрывчаткой, и выделяющейся при их детонации энергии вполне достаточно, чтобы возникло явление сверхновой.

В каком же случае может получиться взрыв такой набитой легкими ядрами звезды? Это было исследовано английскими астрофизиками Ф. Хойлом и У. Фаулером. По их расчетам, когда звезда с массой в десяток солнц дошла в своей эволюции до образования негорючей железной сердцевины, ее внешние слои начинают падать к центру, чтобы поддержать газовое давление в недрах стынущей звезды. При сжатии растут энергия, давление, температура недр. Идут как бы инстинктивные поиски нового ядерного горючего. Но, как ни возрастает температура в железном сердце звезды, новый ядерный котел не включается. Наоборот, начинаются реакции с поглощением энергии, ведущие, например, к расщеплению ядра железа на 13 ядер гелия и 4 нейтрона.

Теперь за каждую секунду звезда сжимает свои размеры в 2 раза. К концу второй секунды катастрофического сжатия могут сложиться условия для его остановки. Таким стоп-краном могут быть образование белого карлика, если масса сжимающейся звезды невелика (менее полутора масс Солнца), или взрыв с образованием нейтронной звезды (вспышка сверхновой). Но, чтобы произошел взрыв, быстрое сжатие должно существенно нарушить структуру звезды.

Оказывается, если звезда успевает при таком сжатии спокойно перестраиваться, т. е. соответствующим образом перераспределять выделяющуюся при сжатии энергию, повышая температуру в центре, то взрыв не произойдет. Для взрыва нужно, чтобы скорость сжатия звезды обогнала скорость звука в ее недрах, тогда спокойное отступление звездных слоев превратится в беспорядочное. Но такая ситуация возникает тогда, когда в центре звезды замедляется повышение температуры, а в зонах легких ядер она будет высока. Таким охлаждающим процессом, как мы видели, может быть расщепление ядер железа.

Кроме того, в центре звезды при больших давлениях идут реакции взаимодействия электронов с элементарными частицами, ведущие к образованию нейтрино и ан-

тинейтрино, например, «урка»-процесс (взаимодействие с ядрами), процесс Чу (с позитронами) и процесс Б. М. Понтекорво (с пионами). Звездные недра с обычными плотностями не задерживают не имеющих зарядов и массы покоя нейтрино, и они беспрепятственно выходят из звезд, унося с собой значительные порции энергии. Но в катастрофически сжимающейся массивной звезде внутреннее строение нарушено: сердцевина с ее массой около одной солнечной быстро сжимается, формируясь в нейтронную звезду. В этот важный момент температура в ней доходит до 200 млрд. градусов, а плотность — до 10^{12} г/см³. На какие-нибудь несколько десятых долей секунды звезда вспыхивает как точечных размеров нейтронная звезда. Ее мощность излучения достигает 10^{52} эрг/сек — в 10^{18} раз выше, чем полная мощность излучения нашего Солнца. В виде нейтрино будет излучено около 10^{52} эрг.

Но при высоких плотностях всепроникаемость нейтрино оказывается ограниченной: они не могут уйти из звездного ядра, не отдав энергии, вследствие чего температура внешних слоев ядра звезды повышается, поднимается и газовое давление — универсальный стоп-кран, останавливающий сжатие звездного ядра.

Однако наружные слои звезды еще некоторое время продолжают падать к центру, и на периферии звездного ядра создается высокое давление, вызывающее детонацию одного из сортов легких ядер, а может быть, и просто тепловой взрыв от избытка энергии, вынесенной сюда нейтрино и антинейтрино. Причем взрыв в любом случае должен освободить энергию в 10^{52} эргов. Образующаяся взрывная волна выбрасывает наружные слои в пространство. Это и наблюдается как вспышка сверхновой звезды. Детали процесса разлета оболочки сейчас всесторонне исследуются. Много лет над этим работают советские ученые В. С. Имшенник, Д. К. Надеждин, Э. К. Грасберг, а в США — С. Колгейт и Р. Уайт, но согласие расчетов с наблюдаемыми кривыми блеска сверхновых пока очень грубое.

В качестве «взрывчатки» подбирались различные сорта легких ядер. В. С. Имшенник, Д. К. Надеждин и Л. И. Иванова анализировали, например, детонацию в кислородном слое проэволюционировавшей звезды, а американские ученые — Д. Арнетт и Дж. Труран — детонацию в углерод-

ной и кремниевой зонах. Но пока удовлетворительное во всех отношениях взрывчатое вещество подобрать еще не удалось. Арнетт и Труран смогли, однако, показать, что роль нейтрино в накоплении энергии на границе звездного ядра не так велика, чтобы создались условия для сильного теплового взрыва (гипотеза Колгейта), поэтому взрыв возникает от ядерной детонации.

Как видим, астрофизики очень строго придираются к свойствам взрывчатого вещества. Его количество и энергосодержание должны давать требуемую энергию, образующаяся взрывная волна должна полностью соответствовать наблюдаемым кривым блеска сверхновых.

При ядерном взрыве сверхновой происходят быстрые процессы образования остальных тяжелых элементов таблицы Менделеева. Сверхновые, по-видимому, единственные «фабрики», производящие химические элементы с атомными весами тяжелее железа. Поэтому при их взрывах должна образовываться точно такая же смесь тяжелых атомных ядер, какую обнаруживают в звездах, газовых туманностях (т. е. в доступных спектральному анализу сгущениях межзвездного газа) и метеоритах. Химический состав этих небесных тел в достаточной степени исследован спектрально и оказывается довольно однородным в пределах объектов одного возраста и звездной подсистемы, за исключением, может быть, содержания самых легких химических элементов — водорода и гелия, относительное содержание которых служит еще более чувствительным показателем не только поколения, но также и возраста самих небесных тел.

В зависимости от того, какой сорт легких ядер в действительности детонирует при явлении сверхновой, будет, очевидно, различным химический состав выбрасываемой при взрыве оболочки. В частности, оказалось, что чисто тепловой (неядерный) взрыв, происходящий вследствие накопления тепловой энергии в оболочке массивной звезды в ходе переноса энергии всепроникающими нейтрино, привел бы к реакциям, создающим тяжелые ядра в количествах, в двести раз превышающих наблюдаемые в смеси химических элементов небесных тел.

Причины взрывов сверхновых I типа

Расчеты и гипотезы, о которых говорилось в предыдущем разделе, относятся к сверхновым с массивными газовыми оболочками, т. е. типа Кассиопеи-А. Что же касается сверхновых I типа, то они, принадлежа к звездному населению промежуточной подсистемы, должны быть финальными стадиями не молодых звезд самых последних поколений, а звезд, имеющих возрасты более миллиарда лет.

Среди таких звезд нет массивных, превышающих в несколько раз массу нашего Солнца. Следовательно, искать звезды, которые вспыхивают как сверхновые I типа, нужно среди тех, которые подобны превращающимся в обычные белые карлики.

По расчетам Хойла и Фаулера взрыв может оказаться возможным и у звезд, превращающихся в белые карлики, если их массы заключены в узких пределах 1,16—1,28 масс Солнца. В этом первом расчете не учитывались, конечно, такие формы энергии, как магнитная и вращательная энергия звезды, которые при сильных сжатиях, как теперь установлено, начинают играть заметную роль.

Более новые идеи о взрывах старых звезд были выдвинуты в 1967 г. американскими астрофизиками А. Финци и Р. Вольфом, которые считают, что сжатие звезды в белый карлик с предельно возможной для белого карлика массой (белые карлики не могут превосходить 1,42 массы Солнца) может растянуться до 1 млрд. лет. В этом случае в слоях, окружающих уплотняющуюся сердцевину звезды, атомные ядра магния, масса которых здесь составляет около 10% массы оболочки, будут в условиях высокого давления поглощать электроны и эти реакции (возможные из-за длительности стадии сжатия) будут создавать условия для детонационного взрыва остальных 90% оболочки, состоящей главным образом из ядер углерода.

Еще более интересную гипотезу высказали в 1969 г. советские астрофизики Г. С. Бисноватый-Коган и З. Ф. Сеидов. Они считают, что, как сверхновые I типа, могут вспыхивать старые звезды с возрастом около 1 млрд. лет, которые при заключительном сжатии в белые карлики были довольно горячими (температура около 50 млн. градусов) и немного больше по массе, чем допустимая для обычных белых карликов. Остывание такого кандидата

в белые карлики идет около 10 млн. лет, и под конец этого процесса, сопровождающегося сжатием звезды, оказывается, что масса будущего белого карлика великовата: сил упругости белого карлика не хватает для остановки сжатия его оболочки. Звезда срывается в коллапс, при этом получается вспышка. Гипотеза авторов не требует искусственных предположений о специальном химическом составе оболочки звезды, что является слабым местом, например, гипотезы Финци и Вольфа. Причиной взрыва при начинающемся коллапсе будет ударная волна.

Особый интерес представляет объяснение формы кривой блеска сверхновой I типа, т. е. характер изменения светимости звезды при вспышке. Возрастание блеска до максимума и быстрое падение его после достижения максимума как в случае новых, так и сверхновых звезд имеют естественное объяснение в том, что при расширении оболочки излучающий слой (фотосфера) некоторое время движется в оболочке наружу, достигает в момент максимума наибольшего радиуса и затем начинает погружаться в глубь оболочки. Но блеск вспыхнувшей звезды падает медленнее, чем показывают соответствующие расчеты. Следовательно, оболочка звезды в течение всего оптического явления продолжает получать энергию, и важно выяснить, что же является источником этой энергии, расход которой изображает кривая блеска.

Одна из гипотез, довольно популярная около двадцати лет назад, полагала, что при взрыве сверхновой образуются неустойчивые (радиоактивные) ядра атомов. В качестве радиоактивного вещества предлагались бериллий-7, калифорний-254 и другие, имеющие период полураспада около 55 суток. Соответствующая подобному процессу радиоактивного распада энергия убывает со временем такими же темпами, как ослабевают светимость или блеск сверхновой после максимума. Следовательно, энергия, поддерживающая ее свечение после достижения максимума светимости, имеет по этой гипотезе радиоактивное происхождение и заключена в веществах самой оболочки. Однако спектры сверхновых I типа не обнаруживают признаков существования каких-либо ожидаемых по гипотезе веществ радиоактивного характера.

Наряду с гипотезой радиоактивного питания свечения оболочки сверхновой имеются и другие. Существуют попытки объяснить изменение блеска сверхновых I типа

прохождением ударных волн в ее оболочке, но пока не проводились соответствующие расчеты.

В конце 1971 г. И. С. Шкловский привел убедительные доказательства, что падение блеска сверхновой после максимума отражает закон изменения излучения рентгеновского источника — нейтронной звезды. Сразу после максимума блеска оболочка сверхновой в течение около месяца остается непрозрачной для рентгеновских лучей центрального тела и блеск ее убывает обратно пропорционально кубу времени, прошедшего после вспышки. Затем оболочка становится прозрачной и убывание блеска идет с этих пор обратно квадрату времени, прошедшего после вспышки.

Сверхновые и образование Солнечной системы

Изучение сверхновых показывает их важную роль в эволюции вещества нашей Галактики и ее составных частей — звезд, межзвездного газа и космических лучей. Все вещество Галактики, за исключением той доли, которая застряла в старых карликовых звездах или превратилась в белые карлики, прошло через «лаборатории» сверхновых, чтобы превратиться в звезды новых поколений и более богатый тяжелыми химическими элементами межзвездный газ.

Но этим далеко не исчерпывается роль сверхновых в рождении небесных тел. Они играют важную роль и в формировании малых космических тел: планет, метеоритов и космической пыли. В связи с этим можно вспомнить, что наше Солнце и планеты образовались около 5 млрд. лет назад из газопылевого облака, содержавшего практически все химические элементы таблицы Менделеева. Это богатство химических элементов — следствие вспышек сверхновых в районе, где потом образовалась Солнечная система.

Химический состав Солнца, планет и метеоритов свидетельствует о том, что их вещество было рождено в недрах сверхновых, поскольку других мест, где бы могли образоваться тяжелые атомные ядра, мы в природе не знаем. Правда, это не значит, что Солнце и планеты образовались из газопылевого облака, которое родилось как часть оболочки какой-то сверхновой. Путь образования этого, как его называют, протопланетного облака, намного слож-

нее, и вошедший в него газ, метеорная (космическая) пыль и метеоритное твердое вещество имели каждое свою одиссею.

Как мы уже знаем, сверхновые выбрасывают свои газовые оболочки с довольно высокими скоростями, и проходят десятки тысяч лет, прежде чем выбрасываемый ими газ значительно затормозится межзвездной средой, и сотни тысяч лет, — прежде чем остатки оболочки без следа растворяются в межзвездном газе, сравнявшись с ним по скоростям и плотностям. Заметим, кстати, что сам межзвездный газ — смесь газов, выброшенных сверхновыми, а его химический состав постоянно обогащается за счет поступлений от новых поколений сверхновых. Вот такой газ и космическая пыль, соответствовавшие химическому составу, характерному для них 5 млрд. лет назад, и пошли на образование Солнечной системы.

Мы пока очень приблизительно знаем, как возникает метеорная пыль. Возможно, это то же самое, что и космическая пыль, вызывающая межзвездное ослабление света в Галактике. Но астрофизики считают, что без космической пыли не мог бы пойти процесс образования планет. Важные сведения о составе газопылевой среды, из которой образовались планеты, дают исследования состава древнейших земных пород и метеоритов. Приблизительно 85% тяжелых элементов в них имеют возраст 9—10 млрд. лет, т. е. возникли в начальный период образования Галактики, когда в звезды превратилось очень много газа и было поэтому много вспышек сверхновых. Выброшенный тогда из сверхновых материал успел распределиться по всей Галактике. Примерно 11—13% тяжелых элементов имеют возраст около 5 млрд. лет, т. е. являются материалом близкой сверхновой, предшествовавшей образованию Солнечной системы. Остальные несколько процентов приходятся на промежуток между этими возрастами.

Здесь следует подчеркнуть существенное различие между метеорными пылинками и метеоритами. Они различаются между собой и степенью рыхлости и своей биографией. Метеорные тела, попадая в атмосферу Земли, сгорают в ней без остатка на стокилометровой высоте (метеоры), и только несгоревшие «шлаки» оседают впоследствии на поверхность планеты. Астрономам удалось выяснить, что представляют собой метеорные тела до попадания в атмосферу: это очень рыхлые образования

из кристаллов различных соединений, слившиеся и сцепившиеся в крупные хлопья — своего рода «космический снег» или, скорее, «космический смог». На рост таких пылинок в условиях низкой температуры и большой разреженности космического пространства уходят миллионы и миллиарды лет. Ведь, чтобы пылинки росли, нужны встречи между ними и частицами на относительно небольших скоростях и возникновение притяжения вследствие разности электрических зарядов пылинок, а не под действием их тяготения. Таким путем вокруг ядер тяжелых элементов конденсируются и кристаллизуются легкие молекулы межзвездного газа. Слипание в «снежный ком» идет медленно, но непрерывно.

При сосредоточении таких хлопьев в одном месте межзвездного пространства в значительном количестве в него будут плохо проникать рентгеновские и космические лучи, поддерживающие температуру межзвездной среды, поэтому в таком облаке из «космического смога» температура понизится до нескольких градусов выше абсолютного нуля. Это обстоятельство ускоряет рост конденсации и кристаллизации пылинок. Образуется газопылевое облако, и начинается процесс формирования звезд и планет.

Мы не будем здесь вдаваться в подробности предполагаемых путей возникновения планет из газопылевого облака. Это сложные процессы, главные стадии которых еще далеко не ясны. Нам здесь хотелось лишь показать, что в создании планетной системы определенную роль сыграли взрывы сверхновых, в ходе которых были созданы ядра тяжелых атомов, основная масса межзвездного газа и пыли.

Но с образованием планетной системы, как мы сейчас увидим, роль сверхновых в истории нашей планеты, по-видимому, не уменьшилась до незначительной.

Картина вспышки близкой сверхновой

Представим себе, что недалеко от нас, скажем на расстоянии 10 пс, вспыхнула сверхновая звезда. Что мы будем видеть на небе и какие последствия это вызовет на Земле? Этот вопрос был изучен И. С. Шкловским и В. И. Красовским в 1957 г. Согласно описанию, приведенному в книге И. С. Шкловского «Сверхновые звезды» (1966 г.), события будут развиваться так.

Примерно в течение одного месяца на небе разгорелась бы яркая звезда, достигая в максимуме блеска — 18 видимой звездной величины. Если вспомнить, что блеск Солнца составляет — 27 звездных величин, а Луны в полнолуние — 12,6 звездной величины, то сверхновая будет в это время создавать освещенность на Земле, в 1000 раз большую, чем Луна, и всего в 1000 раз меньшую, чем Солнце. Такая звезда была бы хорошо заметна в дневное время, а ночью от нее было бы так же светло, как в период белых ночей в Ленинграде. Без преувеличения можно было бы сказать, что с момента появления сверхновой вся наблюдательная астрономия вскоре свелась бы к наблюдениям сверхновой. Да и как могло бы быть иначе? Ведь, даже когда звезда находилась бы за горизонтом, она вызывала бы сильное свечение неба.

Дело в том, что основное свечение звезды в период максимума блеска приходится на крайнюю ультрафиолетовую область спектра. Это излучение ионизировало бы на долгий срок в 100 тыс. лет весь межзвездный водород на несколько десятков парсек вокруг звезды. Это ультрафиолетовое излучение сверхновой в сотни раз превышало бы ультрафиолетовое излучение Солнца. Оно вызвало бы необыкновенно яркое свечение верхних слоев атмосферы — полярное сияние, охватывающее всю ночную сторону Земли. К счастью, само ультрафиолетовое излучение, губительное для живых земных организмов, не дошло бы в опасных размерах до поверхности нашей планеты благодаря активному характеру нашей атмосферы, состоящей кроме азота еще из кислорода и углекислого газа. Ультрафиолетовое излучение было бы поглощено верхними слоями атмосферы.

Яркое свечение сверхновой продолжалось бы несколько лет, пока звезда не перестала бы быть видимой простым глазом. Но вокруг звезды, ставшей почти незаметной, образовалась бы яркая расширяющаяся туманность. Через 30 лет ее размер составлял бы 1° на небе, а через триста лет — уже около 10° . Затем размеры ее росли бы медленнее из-за торможения оболочки в межзвездной среде. Но все-таки через 10 тыс. лет расширяющаяся оболочка сверхновой достигла бы Солнечной системы. Наша планетная система погрузилась бы в эту оболочку, что имело бы уже большие последствия для живых организмов на нашей планете.

И без того светлое ночное небо Земли было бы покрыто причудливыми волокнистыми облаками, своей яркостью подобными Млечному Пути. Но, как мы знаем, внутри оболочки сверхновой заперты релятивистские частицы, обладающие высокими энергиями. Они обрушились бы на Землю и другие планеты. Сила потоков этих космических лучей в сто раз, а иногда и более превышает силу космических лучей в нормальную эпоху. Известно, что, попадая в атмосферу Земли, релятивистские частицы, называемые также первичными космическими лучами, распадаются и образуют ливни вторичных, более мягких (с меньшим запасом энергии) космических лучей. Но при возрастании интенсивности космических лучей значительно повысится количество первичных космических лучей, достигших земной поверхности.

Появление мощных космических лучей у поверхности Земли оказало бы важное влияние на судьбу живых организмов. Средняя радиоактивность воздуха в приземном слое составляет 0,12 р (рентген) в год; из них на радиоактивность, рождаемую космическими лучами, приходится треть величины. При повышении же космического излучения в 100 раз повышение уровня радиоактивности произойдет в 30 раз, а временами — и значительно больше. С точки зрения оценки состояния здоровья людей эта доза вовсе не опасна. Но важно другое. Повышенная космическая радиация существовала бы несколько десятков тысяч лет и была бы опасна для будущих поколений.

И. С. Шкловский и В. И. Красовский предположили, в частности, что вымирание динозавров, беспредельно господствовавших на Земле в юрский период и вдруг быстро вымерших в конце мелового периода, возможно, было связано со вспышкой, близкой сверхновой, вызвавшей повышение уровня космического излучения на сотню тысяч лет. Как известно, радиоактивность является одной из причин скачкообразных изменений свойств животного или растения, передающихся по наследству. При повышении уровня радиации число мутаций (изменений наследственности) возрастает. Причем организмы с коротким циклом созревания малочувствительны к повышению радиации, тогда как имеющие длительный цикл созревания резко реагируют на небольшие дозы радиации. Мутации могут действовать в сторону улучшения качеств того или иного биологического вида, но чаще всего это

проявляется в молодом, создающемся виде. Старый же биологический вид, развившийся, от мутаций страдает чаще и деградирует. Жертвой чувствительности к радиации, возможно, и оказались динозавры, бывшие в меловую эпоху господствующим классом животных. А развившиеся теперь классы млекопитающих и птиц тогда были еще молодыми с крепкой наследственностью, улучшавшейся даже от «космических биологических экспериментов». В связи с этим будущая вспышка сверхновой была бы опасна наиболее развитым классам животных.

Изменение наследственности вследствие мутаций, вызываемых радиоактивностью среды, — не только важный двигатель эволюции живой природы. По мнению И. С. Шкловского, не исключено, что и сама жизнь на нашей планете могла зародиться в океане вследствие длительного повышения уровня радиации, вызванного вспышкой сверхновой вблизи нашей планетной системы примерно 2—3 млрд. лет назад.

Какие же остатки сверхновых являются сейчас самыми близкими к нам? Самый близкий остаток оболочки сверхновой — это волокнистая туманность в Лебеде, расположенная на расстоянии 770 пс от нас и имеющая почтенный возраст в 70 тыс. лет. Но ближе нее расположено несколько пульсаров, имеющих намного более старый возраст. Самый близкий — СРО808+74, находящийся в 190 пс, его возраст около 100 млн. лет. Конечно, эти объекты не были виновниками биологических катастроф и взлетов на нашей планете. Обнаружить пульсар мы можем только в том случае, если пучок излучаемой им энергии периодически пробегает по району Солнечной системы. Возможно, что старые близкие пульсары скрываются среди слабых близких звезд, не проявляя себя радиоизлучением и оптическими пульсациями из-за неблагоприятной ориентации магнитной и вращательной осей по отношению к нам. Для выявления таких объектов нужны другие способы поиска.

Заметим, кстати, что, по расчетам И. С. Шкловского, при частоте вспышек сверхновых одна на сто лет в Галактике вспышки на расстоянии до 10 пс от Солнца в среднем повторяются через 1,5 млрд. лет, а в радиусе до 20 пс от него уже через 200 млн. лет, на расстояниях до 30 пс через примерно 60 млн. лет и т. д. — обратно пропорционально кубу расстояния от Солнца.

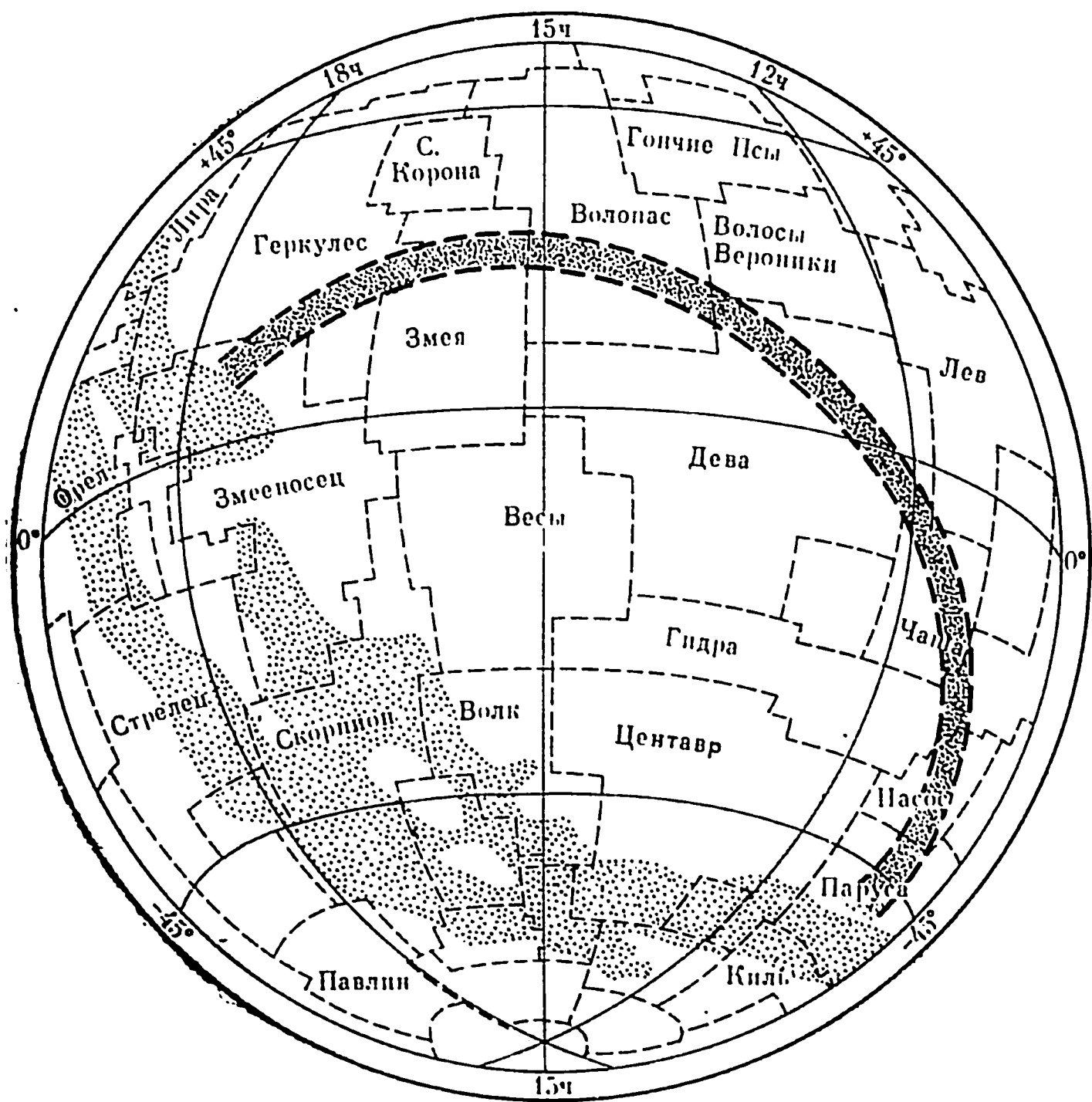


Рис. 40. Положение большой радиоизлучающей «петли» на карте неба

В связи с этим интересна особенность радиоизлучения нашей Галактики, обнаруженная еще 20 лет назад при одном из ранних исследований интенсивности радиоизлучения всей части неба, доступной наблюдениям в Северном полушарии. Кроме ярко радиоизлучающего пояса Млечного Пути на небе была обнаружена еще большая радиоизлучающая петля (или шпора, отросток), идущая через созвездия Стрельца, Змееносца, Геркулеса, Волопаса, Девы и по ряду южных созвездий. По форме петля представляет собой круг небесной сферы диаметром около 110° с центром в созвездии Волка (рис. 40).

Природа этого радиоизлучающего объекта неясна. Наряду с другими гипотезами была предложена для его объяснения и гипотеза о том, что петля представляет собой остаток оболочки сверхновой, вспыхнувшей на расстоянии 20—30 пс от Солнца около 50 тыс. лет назад

(оценки эти получаются при использовании формул И. С. Шкловского, полученных для остатка сверхновых типа волокнистой туманности в Лебеде). В пользу гипотезы говорил нетепловой характер радиоизлучения петли. Но в ее области не найдено заметного оптического свечения, сходного с волокнами туманности в Лебеде. Правда, в радиоизлучении как будто такой волокнистый характер обнаруживается, так что какое-то сходство с волокнистой туманностью в Лебеде имеется.

И. С. Шкловский и Е. К. Шеффер, отмечая такое сходство структур, возрастов и других особенностей этих двух объектов, считают, что подтверждением одинаковой их природы было бы обнаружение мягкого рентгеновского излучения петли, подобного тому, которое найдено в волокнистой туманности Лебеда. К сожалению, его с трудом удастся отличить от слабого рентгеновского излучения Галактики.

Кроме этой большой петли на небе обнаружено еще шесть подобных радиоструктур меньших размеров и слабее по интенсивности. В пределах одной из них имеются оптически наблюдаемые слабые волокна.

Если петля была остатком сверхновой, то повторения вспышки сверхновой вблизи Солнца ожидать следует нескоро, биологическая безопасность может оцениваться в 100 млн. лет. Однако не исключено, что в недалеком будущем мы станем очевидцами вспышки сверхновой в нашей Галактике на расстоянии в 1—3 кпс от Солнца. Блеск такой сверхновой достигнет —10 звездной величины, если она не вспыхивает в области с сильным межзвездным поглощением. Наблюдение такой вспышки станет выдающимся научным событием в астрономии. Эту звезду можно будет наблюдать несколько лет и затем следить за развитием выброшенной ею туманности и за излучением в рентгеновской, оптической и радиообластях. Несомненно, будет собран исключительный по ценности и объему информации материал. Его анализ даст решение многих загадок в природе сверхновых, над решением которых сейчас упорно трудятся астрономы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное содержание нашей книги составлял рассказ о самых сильных взрывных звездах — новых и сверхновых. Читатель убедился, что со вспышкой таких звезд связаны важные и сложные явления. Знакомясь с ними, мы не только встретились с удивительными оптическими процессами, но и оказались перед чрезвычайно экзотическими образцами звездного мира.

В случае новых звезд большой неожиданностью оказалась их особая двойственность. Мы видели, правда, что она обнаружена лишь у части новых звезд, однако имеются убедительные объяснения, почему ее нельзя обнаружить в остальных случаях. В недалеком будущем следует ожидать появления теории новых звезд, объясняющей необходимость тесной двойной звезды для явления новой и другие особенности этого феномена.

Вообще в последнее время исследование тесных двойных звезд стало особенно важным и по ряду других причин. Эти «спамские близнецы» звездного мира оказались замешанными не только в историю с новыми звездами. Им приписана и решающая роль в образовании быстро движущихся звезд-«бегунов», вылетающих, как из пращи, из тесной двойной системы при взрыве одного компонента, который образует сверхновую звезду. Родилась и еще одна изящная идея о том, что один из компонентов тесной двойной звезды может претерпеть гравитационный коллапс и превратиться в точечную массу или, как ее еще называют, коллапсар, черную дыру. И наконец, обнаруженные средствами рентгеновской астрономии источники рентгеновского излучения теперь удалось отождествить с оптическими объектами, природа которых пока еще остается загадочной, но в ряде случаев это, по-видимому, опять-таки тесные двойные звезды! Уникальность тесных двойных связана со своеобразием эволюции их компо-

нентов. Тема эта выходит далеко за рамки нашей книги.

Что касается сверхновых звезд, то сведения о них до сих пор еще чрезвычайно отрывочны: мы знаем одно о такой-то сверхновой, другое — о другой, третье — о галактической сверхновой, кое-чем сходной с предыдущими, но имеющей сейчас трехсотлетний возраст, но ни об одной сверхновой мы не знаем всех характеристик сразу. Это обстоятельство запутывало картину и, несомненно, расхолаживало исследователей. Однако те факты, которые удастся выяснить тем или иным путем, оказываются настолько важными для всей астрофизики, что астрономы уже примирились с мозаичным характером сведений об этом уникальном классе звезд.

Положение начинает улучшаться буквально в самые последние месяцы. В апреле 1972 г. в созвездии Центавра в неправильной галактике NGC 5253 была обнаружена вспышка сверхновой, достигавшая в максимуме 7-й звездной величины. Это самая интенсивная по видимому блеску сверхновая в нашем столетии. Несмотря на то что эту вспышку можно видеть только на юге нашей страны и на юге Европы, а также с обсерваторий США и стран Южного полушария, сразу после открытия ее стали наблюдать многие исследователи. Современные средства позволяют проследить изменение блеска этой вспышки до 24-й звездной величины, т. е. на протяжении около двух с половиной лет. Таким образом, будет перекрыт рекорд, принадлежащий древним наблюдателям Сверхновой 1054 г., которую они видели в течение почти двух лет. Уже получено множество спектров сверхновой 1972e, и это подталкивает исследователей поспешить с изучением спектров остальных сверхновых, полученных в прошлые годы. В этом отношении очень продуктивным оказался 1973 г., когда появились многочисленные работы по сверхновым и в Италии состоялась Международная научная конференция по сверхновым.

Явления сверхновых, несмотря на сравнительную редкость, играют первостепенную роль во многих сторонах звездной жизни и, по-видимому, в возникновении планетных систем. Однако современная теория эволюции звезд, галактик и планет еще находится в стадии становления. Предстоит большой и кропотливый труд перехода от разнохарактерных, труднодоказуемых гипотез и грубых при-

кидочных расчетов, порою обнаруживающих странное согласие и с той и с другой версиями (так бывает, когда мало наблюдательных данных или очень грубы предположения), до проверенной наблюдениями единственно верной теории.

Еще труднее создание теории самих сверхновых, потому что в этом явлении переплетаются в сложный узел вопросы звездной эволюции и космогонии небесных тел, синтеза химических элементов и межзвездной пыли, газовой динамики как в процессе сильного взрыва, так и в стадии торможения газовой оболочки сверхновой межзвездной средой, теории излучения расширяющейся оболочки, магнетизма, происхождения космических лучей, нетеплового оптического, рентгеновского, гамма- и радиоизлучений.

Обратим внимание, что здесь «случайно» перечислен круг почти всех актуальных направлений галактической астрофизики. Иными словами, если бы понадобилось изучить основы современной астрофизики звезд и звездных систем, то в принципе было бы достаточно тщательно ознакомиться со всеми проблемами, касающимися в той или иной степени сверхновых звезд. Незавершенность и несовершенство наших знаний о них в известной степени соответствуют незавершенности проблем самой астрофизики и трудности задач, стоящих перед ней сейчас.

Тем не менее опыт последнего десятилетия показывает, что период затишья в исследовании сверхновых звезд закончился. Их проблемы оказались на самом боевом участке современной астрофизики. Сейчас в руки астрофизиков поступает обильный поток новых фактов, обобщение которых является главной задачей будущих исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Агекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика. Изд. 2-е. М., «Наука», 1970.
- Варденга Г., Оконов Э. Вселенная частиц. М., «Советская Россия», 1972.
- Воронцов-Вельяминов Б. А. Галактики, туманности и взрывы во Вселенной. М., «Просвещение», 1967.
- Гинзбург В. Л. Современная астрофизика. М., «Наука», 1970.
- Горбачук В. Г. Космические взрывы. Изд. 2-е. М., «Наука», 1972.
- Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. М., «Наука», 1973.
- Каплан С. А. Физика звезд. Изд. 2-е. М., «Наука», 1970.
- Струве О., Зебергс В. Астрономия XX века. М., «Мир», 1968.
- Струве О., Линдс Б., Пилланс Э. Элементарная астрономия. Изд. 2-е. М., «Наука», 1967.
- Уикс Т. Астрофизика высоких энергий. М., «Мир», 1972.
- Фауль Г. Возраст пород, планет и звезд. М., «Атомиздат», 1968.
- Ходж П. Революция в астрономии. М., «Мир», 1972.
- Шкловский И. С. Сверхновые звезды. М., «Наука», 1966.
- Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. Изд. 3-е. М., «Наука», 1973.
- Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. Л., «Наука», 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	3
Глава I.	Астрономы исследуют звезды . . .	6
Глава II.	Будни Вселенной	23
Глава III.	Обыкновенные новые звезды . . .	52
Глава IV.	Спектральные летописи новых звезд	63
Глава V.	Особые разновидности новых звезд	76
Глава VI.	Что скрывается за вспышками новых звезд?	85
Глава VII.	Сверхновые в далеких галактиках	102
Глава VIII.	Спектры сверхновых во время их вспышек	117
Глава IX.	Вспышки сверхновых в нашей Галактике	129
Глава X.	Реликты оболочек сверхновых . .	141
Глава XI.	Пульсары — еще один сорт реликтов сверхновых	157
Глава XII.	Несколько трудных вопросов . .	184
	Заключение	202
	Литература	205

Юрий Павлович Псковский

Новые и сверхновые звезды

Утверждено к печати
редколлегией серии
научно-популярных изданий
Академии наук СССР

Редактор издательства *В. К. Низковский*
Художник *В. И. Хлебников*
Художественный редактор *В. Н. Тихунов*
Технический редактор *В. Д. Прилепская*
Корректоры *В. А. Бобров* и *М. Н. Борткова*

Сдано в набор 15/III-1974 г. Подписано к печати 29/VII-1974 г.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага № 1. Усл. печ. л. 10,92.
Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 22.300. Т-12065. Тип. зак. 1054.
Цена 70 коп.

Издательство «Наука» 103717 ГСП
Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
1-я типография издательства «Наука», 199034
Ленинград В-34, 9 линия, дом 12



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ
КНИГА:

ПЕРОВ В. Д., ШТЕРН М. И.
Космос — Земле. 10 л. 65 к.

Книга знакомит читателей с важнейшими результатами научных исследований, осуществляемых в космосе, с конструкцией и назначением различных космических аппаратов. Читатель узнает, как космическая техника используется в метеорологии, обеспечивая службу погоды оперативной информацией, как с помощью спутников «Молния» осуществляется передача телевизионных программ в самые отдаленные районы нашей страны, как ИСЗ помогают геодезистам и разведчикам природных ископаемых, используются для навигации и т. п. Работа включает краткий очерк истории отечественного и зарубежного ракетостроения, а также раздел, посвященный перспективам развития космической науки и техники. Книга рассчитана на широкий круг читателей.

Адреса магазинов
«Академкнига»:

85640

480391 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97, 370005 Баку, ул. Джапаридзе, 13, 320005 Днепропетровск, проспект Гагарина, 24, 734001 Душанбе, проспект Ленина, 95, 664033 Иркутск, 33, ул. Лермонтова, 303, 252030 Киев, ул. Ленина, 42, 277012 Кишинев, ул. Пушкина, 31, 443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2, 192104 Ленинград, Д-120, Литейный проспект, 57, 199164 Ленинград, Менделеевская линия, 1, 199004 Ленинград, 9 линия, 16, 103009 Москва, ул. Горького, 8, 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7, 630090 Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22, 630076 Новосибирск, 91, Красный проспект, 51, 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137, 700029 Ташкент, Л-29, ул. Ленина, 73, 700100 Ташкент, ул. Шота Руставели, 43, 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18, 450075 Уфа, Коммунистическая ул., 49, 450075 Уфа, проспект Октября, 129, 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42, 310003 Харьков, Уфимский пер., 4/6.